



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**URČOVÁNÍ VZDÁLENOSTI A POZICE  
POMOCÍ ULTRAZVUKU**

DISTANCE AND POSITION DETERMINATION USING ULTRASOUND

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Dalibor Bartoš

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Edita Hejátková

Ing. Jiří Kantor

BRNO 2018

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Dalibor Bartoš

**ID:** 186027

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Určování vzdálenosti a pozice pomocí ultrazvuku

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte přípravek umožňující lokalizovat objekt v rovině před několika ultrazvukovými měřiči vzdálenosti. K řízení měničů využijte obvody NCV75215 od společnosti ON Semiconductor. K určení polohy vytvořte algoritmus založený na principu trilaterace, jenž by měl umožňovat současně lokalizovat více než jednu překážku. Proveďte úpravy stávajícího softwaru a firmwaru pro mikrokontrolér umožňující implementaci výsledného algoritmu a zobrazení polohy objektu. Důraz by měl být kladen především na rychlost a přesnost měření. Funkčnost přípravku ověřte měřeními.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 31.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Edita Hejátková

**Konzultant:** Ing. Jiří Kantor, ON Design Czech s r.o.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá měřením vzdálenosti pomocí ultrazvuku a možnostmi využití tohoto měření k určení polohy objektu v rovině. V první části jsou popsány principy šíření ultrazvuku, funkce piezoelektrického měniče, základy triangulace i trilaterace a rozšířené systémy parkovacích asistentů. Druhá část práce obsahuje návrhy několika algoritmů, které umožňují lokalizaci až dvou objektů současně. V poslední části práce je popsána implementace vytvořených algoritmů do softwaru a přípravky využití k ověřovacím měřením.

# **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ultrazvuk, ultrazvukové senzory, určení pozice, trilaterace, parkovací asistent

# **ABSTRACT**

This thesis describes distance measurement using ultrasound and its application in determining position of an object. First part of this thesis describes principles of ultrasound wave propagation, piezoelectric transducers, basics of both triangulation and trilateration and different kinds of park assist systems. The second part contains description of algorithms designed to determine position of two objects at the same time. Last part of the thesis describes implementation of created algorithms into software and also modules used in the test measurement.

# **KEYWORDS**

Ultrasound, ultrasonic sensor, position determination, trilateration, park assist

BARTOŠ, D. *Určování vzdálenosti a pozice pomocí ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2018. 54 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce Ing. Edita Hejátková, Ing. Jiří Kantor.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Určování vzdálenosti a pozice pomocí ultrazvuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucím bakalářské práce Ing. Editě Hejátkové a Ing. Jiřímu Kantorovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>viii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Měření vzdálenosti ultrazvukem</b>	<b>2</b>
1.1 Ultrazvuk a jeho vlastnosti .....	3
1.1.1 Odraz ultrazvuku.....	4
1.1.2 Základy měření vzdálenosti ultrazvukem .....	7
1.2 Piezoelektrický měnič a jeho vlastnosti.....	8
1.2.1 Piezoelektrický měnič Murata MA58MF14-7N.....	12
1.3 Popis integrovaného obvodu NCV75215 .....	13
1.4 Princip triangulace a trilaterace .....	15
1.5 Rozšířené systémy parkovacích asistentů .....	16
1.5.1 Elektromagnetické parkovací asistenty .....	16
1.5.2 Systém s akustickou signalizací.....	16
1.5.3 Systém s indikací vzdálenosti překážky a přibližné pozice .....	17
1.5.4 Kombinované systémy se senzory a parkovací kamerou .....	17
1.5.5 Aktivní parkovací asistenty .....	18
<b>2 Návrh algoritmů</b>	<b>19</b>
2.1 Základní lokalizace jedné překážky s využitím dvou ultrazvukových senzorů .....	19
2.2 Lokalizace dvou překážek s využitím dvou ultrazvukových senzorů ....	25
2.3 Lokalizace dvou překážek s využitím tří ultrazvukových senzorů .....	32
2.3.1 Algoritmus využívající dvě měření k potvrzení pozice .....	33
2.3.2 Algoritmus využívající tři měření k potvrzení pozice .....	34

<b>3</b>	<b>Implementace algoritmů a jejich ověření</b>	<b>39</b>
3.1	Využité přípravky .....	39
3.1.1	Modul P215_EVK_V1 .....	39
3.1.2	Modul P215_TRIANG_V1.....	40
3.1.3	Imitace nárazníku vozidla .....	40
3.2	Popis původního softwaru a firmwaru .....	41
3.3	Popis upraveného softwaru a firmwaru .....	42
3.3.1	Vytvořené grafické uživatelské rozhraní a jeho ovládání.....	45
3.4	Ověřovací měření a jeho výsledky.....	48
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Tabulky naměřených hodnot</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Imitace nárazníku</b>	<b>63</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Ultrazvukový parkovací senzor v zadním nárazníku automobilu .....	2
Obr. 1.2: Odraz a lom vlnění na rozhraní plynného a pevného prostředí [5] .....	5
Obr. 1.3: Jednoduchý případ měření vzdálenosti ultrazvukem .....	7
Obr. 1.4: Náhradní obvod piezoelektrického měniče [18].....	8
Obr. 1.5: Zjednodušený náhradní obvod piezoelektrického měniče s jednou rezonanční frekvencí [14].....	9
Obr. 1.6: Uzavřený piezoelektrický měnič připravený pro zabudování do nárazníku vozidla (vlevo) a dva otevřené měniče tvořící dvojité systém (vpravo). 10	
Obr. 1.7: Možné zapojení piezoelektrického měniče v obvodu obsahujícím integrovaný obvod NCV75215 [11] .....	11
Obr. 1.8: Průběh napětí na piezoelektrickém měniči (žlutě), na primárním vinutí transformátoru (zeleně a červeně) a na výstupu přijímače (fialově) při buzení deseti pulsy .....	12
Obr. 1.9: Vyzařovací charakteristiky měničů (červená = vertikální, modrá = horizontální) [20] .....	13
Obr. 1.10: Zjednodušené průběhy signálů na konfigurovatelných výstupech obvodu NCV75215 během vysílání a následného příjmu odražených signálů ...	14
Obr. 1.11: Zjištění polohy objektu triangulací.....	15
Obr. 1.12: Parkovací asistent s ukazatelem přibližné polohy překážky 0 .....	17
Obr. 2.1: Měření vzdálenosti jedné překážky dvěma senzory – rozmístění senzorů a signály na přijímačích přiřazených k jednotlivým senzorům .....	20
Obr. 2.2: Rozdíl mezi změřenými časy a časy potřebnými pro přepočty na vzdálenosti	21
Obr. 2.3: Výpočet polohy překážky v prostoru .....	22
Obr. 2.4: Problém s lokalizací objektu za přítomnosti více překážek .....	23
Obr. 2.5: Nesprávně určená poloha překážky za přítomnosti dvou objektů.....	24
Obr. 2.6: Možné kombinace časů příchodu odražených signálů od dvou překážek.....	25
Obr. 2.7: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu převádějícího změřené časy na vzdálenosti .....	28
Obr. 2.8: Princip algoritmu potvrzujícího pozice objektů .....	29
Obr. 2.9: Postup algoritmu při potvrzování správnosti změřených vzdáleností k objektu .....	30
Obr. 2.10: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost dvou změřených vzdáleností.....	31



Obr. 2.11: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost měření na základě dvou po sobě jdoucích měření .....	33
Obr. 2.12: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost měření na základě tří měření .....	35
Obr. 2.13: Výpočet souřadnic objektu ze změřených vzdáleností.....	36
Obr. 2.14: Postup algoritmu při vyhledávání správně změřených vzdáleností k objektu s využitím údajů ze všech tří senzorů.....	38
Obr. 3.1: Modul P215_EVK s obvodem NCV75215 a připojený piezoelektrický měnič .....	39
Obr. 3.2: Hlavní modul P215_TRIANG.....	40
Obr. 3.3: Podoba původního softwaru s otevřenými okny sloužícími ke konfiguraci čipů NCV75215 a ke spouštění měření až dvěma čipy současně.....	41
Obr. 3.4: Diagram znázorňující požadované chování upraveného softwaru .....	42
Obr. 3.5: Projev zachycení echa obvodem NCV75215 na sběrnici I/O Line v režimu 'standard' .....	43
Obr. 3.6: Komunikace na I/O Line během jednoho měřicího cyklu (bez zachycených odrazů) .....	44
Obr. 3.7: Okno Measurement .....	45
Obr. 3.8: Okno Trilateration .....	46
Obr. 3.9: Měřicí stanoviště s nárazníkem a použitými překážkami.....	48
Obr. 3.10: Rozdíl mezi ideálním místem odrazu ultrazvuku od překážky a skutečností	50
Obr. 3.11: Vyznačení oblastí v nichž je možné určit pozici překážky jednotlivými algoritmy .....	50
Obr. 3.12: Okno trilateration při použití algoritmu založeného na dvojitěm potvrzování vzdáleností. ....	51
Obr. 3.13: Komunikace na I/O Line během jedné vteřiny při nejrychlejším možném spuštění měření (bez zachycených ech).....	52

# SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Naměřené časy uložené v paměti po ukončení obou měření .....	26
Tab. 2.2: Tabulka převedených vzdáleností v případě dvou měření .....	28
Tab. 2.3: Průběh měřicího cyklu v případě použití tří parkovacích senzorů .....	32
Tab. 2.4: Tabulka převedených vzdáleností v případě provedení tří měření třemi senzory .....	32
Tab. 4.1: Hodnoty naměřené při použití algoritmu založeného na využití všech tří měření .....	60
Tab. 4.2: Hodnoty naměřené při použití algoritmu založeného na porovnávání dvou po sobě jdoucích měření .....	61
Tab. 4.3: Hodnoty naměřené při mapování oblasti detekce překážky s využitím algoritmu založeného na využití všech tří měření .....	62
Tab. 4.4: Hodnoty naměřené při mapování oblasti detekce překážky s využitím algoritmu založeného na porovnávání pouze dvou po sobě jdoucích měření .....	62

# ÚVOD

Lokalizace objektu, byť jen v rovině, měla vždy velký význam například při kreslení map nebo při navigaci. K těmto účelům se vyvinuly postupy využívající především trigonometrii. Nejznámějším způsobem určování souřadnic objektu v prostoru je triangulace, při které se v několika místech měří úhel mezi objektem a dalším měřicím stanovištěm. V dnešní době se spíše využívá trilaterace založená na přímém měření vzdálenosti mezi objektem a měřicím bodem. Vzdálenost je možné měřit například pomocí ultrazvuku, přesněji pomocí měření doby, za kterou ultrazvuk urazí vzdálenost od jeho zdroje k objektu a po odrazu zpět k vysílači. Právě s lokalizací objektu pomocí ultrazvuku se v dnešní době velmi často setkáváme v automobilech vybavených parkovacími asistenty. Ty jsou schopny upozornit řidiče na přítomnost překážky buďto akusticky, nebo i v grafické podobě. V posledních letech se výrobci snaží zlepšovat schopnosti asistentů a stávají se z nich aktivní asistenty, které jsou schopny nalézt volné místo na zaparkování a samostatně do něj s vozidlem zajet. Všechny tyto systémy jsou závislé na vysoké spolehlivosti zpracování naměřených údajů, což je jeden z aspektů, na který bude tato práce zaměřena.

Cílem práce je sestavení přípravku schopného lokalizovat více objektů v rovině před několika ultrazukovými senzory, čímž by se měl lišit od mnoha existujících řešení, jež obvykle určí pozici pouze jednoho objektu. Výsledný přípravek má demonstrovat schopnosti obvodu NCV75215 od společnosti ON Semiconductor, který je určen k aplikaci v parkovacích asistentech, proto je i samotná práce zaměřená na možné využití v automobilech. Z tohoto důvodu bude také kladen důraz na velkou rychlost měření, aby bylo možné lokalizovat i překážky za pohybu. Zjištěné pozice objektů budou zobrazeny v grafickém uživatelském rozhraní vytvořeném v upraveném softwaru.

Text práce je členěn do tří hlavních kapitol. V té první jsou především popsány vlastnosti ultrazvuku, jež mají vliv při jeho využití k měření vzdálenosti. Rovněž jsou popsány piezoelektrické měniče sloužící jako zdroj i přijímač ultrazvuku a samotný integrovaný obvod NCV75215 určený k jejich řízení. V závěru kapitoly se nachází krátké pojednání o několika druzích na trhu rozšířených parkovacích asistentů. Druhá kapitola se zaměřuje na vyvinuté algoritmy, pomocí kterých jsou ze změřených dat zjišťovány pozice objektů v prostoru. Poslední kapitola popisuje provedené úpravy softwaru a firmwaru, přípravky využití k ověřovacím měřením a samotné výsledky těchto měření.

# 1 MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI ULTRAZVUKEM

Ultrazvuk je mechanické vlnění, jehož frekvence leží nad pásmem slyšitelných frekvencí pro člověka. V praxi nalézá mnoho uplatnění, mezi které patří například jeho všeobecně známé využití v medicínských aplikacích (lékařská ultrasonografie). Velmi často se využívá i k měření vzdálenosti. Typickým příkladem je sonar na lodích nebo echolokace využívaná některými živočichy. V automobilovém průmyslu ultrazvuk našel využití v podobě ultrazvukových parkovacích senzorů, které vysílají a přijímají ultrazvuk a na základě doby změřené od jeho vyslání do zpětného příjmu vyhodnocují vzdálenost objektů okolo vozidla. Tyto senzory lze na vozidle snadno identifikovat díky jejich specifickému vzhledu zobrazenému na obr. 1.1.

Tato kapitola slouží k seznámení s vlastnostmi ultrazvuku důležitými pro jeho využití při měření vzdálenosti a také s piezoelektrickými měniči, které obvykle tvoří základ parkovacích senzorů. Vzhledem k povaze zadání budou také analyzovány některé typy rozšířených parkovacích asistentů využívajících parkovací senzory k lokalizaci překážek.



Obr. 1.1: Ultrazvukový parkovací senzor v zadním nárazníku automobilu

## 1.1 Ultrazvuk a jeho vlastnosti

Ultrazvuk je mechanické vlnění, které se může šířit pouze v látkovém prostředí. V takovém prostředí se šíří mezi jednotlivými částicemi, které jsou rozkmitávány kolem svých rovnovážných poloh. Ve vzduchu se šíří pouze podélné (longitudální) vlnění, jenž se vyznačuje periodickým zhušťováním a zředováním částic ve směru šíření vlny. Příčné (transverzální) vlny, v nichž částice prostředí kmitají kolem rovnovážných poloh kolmo na směr šíření vlny, vznikají pouze v pevných látkách [5].

Rychlost postupu akustické vlny danou látkou je nazývána rychlostí šíření zvuku  $v$  a vzdálenost mezi stejně zahuštěnými nebo zředěnými místy se nazývá vlnovou délkou  $\lambda$ . Mezi těmito veličinami platí vztah:

$$\lambda = v \times T = \frac{v}{f} \quad [\text{m}], \quad (1.1)$$

v němž  $T$  je perioda vlnění a  $f$  je frekvence vlnění, která se v případě ultrazvuku pohybuje nad hranicí 20 kHz. Akustické vlnění s takovou frekvencí již není pro člověka slyšitelné, ale některá zvířata jej stále vnímají a úspěšně využívají (např. netopýři k echolokaci). Rychlost šíření zvuku není možné zaměňovat s akustickou rychlostí  $v_a$ , jenž definuje rychlost kmitání částice okolo její rovnovážné polohy.

Při šíření ultrazvuku vzduchem vznikají vlivem periodického zhušťování a zředování částic místa s přetlakem, respektive podtlakem vůči normálnímu atmosférickému tlaku, což se projevuje akustickým tlakem  $p_a$ . V daném prostředí je tedy celkový tlak  $p_c$  roven [5]:

$$p_c = p_a \pm p_s \quad [\text{Pa}], \quad (1.2)$$

kde  $p_s$  je statický tlak v prostředí. Během šíření akustického vlnění prostorem je rovněž přenášena energie. Součinem akustické rychlosti  $v_a$  a akustického tlaku  $p_a$  se získá veličina s názvem intenzita zvuku  $I$ , která se používá k objektivnímu popisu hlasitosti zvuku v daném místě. Intenzita zvuku rovněž odpovídá podílu výkonu akustického vlnění  $P$  a plochy  $S$ , kterou toto vlnění prochází, což reflektuje vztah [7]:

$$I = \frac{P}{S} = p_a \times v_a \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (1.3)$$

V praxi je často používána veličina hladina akustického tlaku  $L_p$ , která je rovněž měřítkem zvukové energie vyzařované ze zdroje zvuku. Z akustického tlaku nebo intenzity se vypočítá pomocí vztahu [7]:

$$L_p = 20 \times \log\left(\frac{p_a}{p_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad [\text{dB}], \quad (1.4)$$

kde  $p_0$  označuje prahovou hodnotu akustického tlaku (práh slyšitelnosti), která je rovna 0,02 mPa, a  $I_0$  označuje prahovou hodnotu akustické intenzity (práh slyšitelnosti) rovnu  $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  [7]. Práh bolesti je poté definován intenzitou zvuku  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Tyto hodnoty se liší o mnoho řádů, proto je hladina akustického tlaku v logaritmické míře používanější.

Prahovým hodnotám odpovídá hladina akustického tlaku 0 dB respektive 130 dB. Hladina akustického tlaku, kterou je použitý zdroj ultrazvuku schopný generovat v určité vzdálenosti je jedním z jeho důležitých parametrů.

Rychlost šíření zvuku ve vzduchu (i ostatních plynech) není konstantní, ale je ovlivněna tlakem, teplotou a vlhkostí vzduchu. Tyto faktory reflektuje vztah [16]:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa \times p_0}{\rho_0}} \times (1 + \gamma \times 0,5 \times \vartheta) \quad [\text{m.s}^{-1}], \quad (1.5)$$

kde  $\kappa$  je Poissonova konstanta,  $p_0$  je tlak plynu při 0 °C,  $\rho_0$  je hustota plynu při 0 °C,  $\gamma$  je teplotní činitel rozpínivosti plynu a  $\vartheta$  je teplota plynu ve stupních Celsia. U vzduchu je při teplotě  $\vartheta = 0$  °C atmosférický tlak  $p_0 = 101,3$  kPa a příslušná hustota vzduchu je  $\rho_0 = 1,29$  kg.m<sup>-3</sup>. Poissonova konstanta je pro suchý vzduch s danou teplotou rovna  $\kappa = 1,4$  a činitel rozpínivosti plynu je pro ideální plyny  $\gamma = 1/273,15$  K<sup>-1</sup> [13][17]. Z této rovnice vychází rychlost zvuku při teplotě 20 °C na přibližně 343 m.s<sup>-1</sup> (viz rovnice 1.6).

$$v_{(\vartheta=20^\circ\text{C})} = \sqrt{\frac{1,4 \times 101,3 \times 10^3}{1,29}} \times \left(1 + \frac{1}{273,15 \times 2} \times 20\right) = 343,71 \text{ m.s}^{-1} \quad (1.6)$$

Pro výpočet rychlosti zvuku v suchém vzduchu lze využít i následující jednodušší vztah, jenž je v okolí několika desítek stupňů od teploty 0 °C dostatečně přesný [16]:

$$v = 331,57 + 0,607 \times \vartheta \quad [\text{m.s}^{-1}]. \quad (1.7)$$

Vliv relativní vlhkosti nebyl v rovnici 1.5 zahrnut, jelikož její vliv na výslednou rychlost není oproti tlaku a teplotě tak významný [17].

Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je pouze zlomkem rychlosti šíření světla ve stejném prostředí, což ale není na závadu, jelikož to umožňuje mít nižší nároky na rychlost zpracování signálu měřicími přístroji [2]. Negativně se ale nižší rychlost projevuje na délce celého měření. Závislost rychlosti zvuku na mnoha faktorech také měření značně ovlivňuje, a pokud nedochází k odpovídající kompenzaci, může způsobit značnou chybu měření.

### 1.1.1 Odraz ultrazvuku

Vyzářené ultrazvukové vlnění se ve stejnorodém prostředí pohybuje přímočaře až do chvíle, než dorazí na rozhraní dvou prostředí. Tím může být například přechod z plynu do pevné látky. Jednotlivá prostředí jsou charakterizována akustickou impedancí  $Z_a$ . Tu lze pro dané prostředí vypočítat vztahem [5]:

$$Z_a = \rho \times v \quad [\text{kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}], \quad (1.8)$$

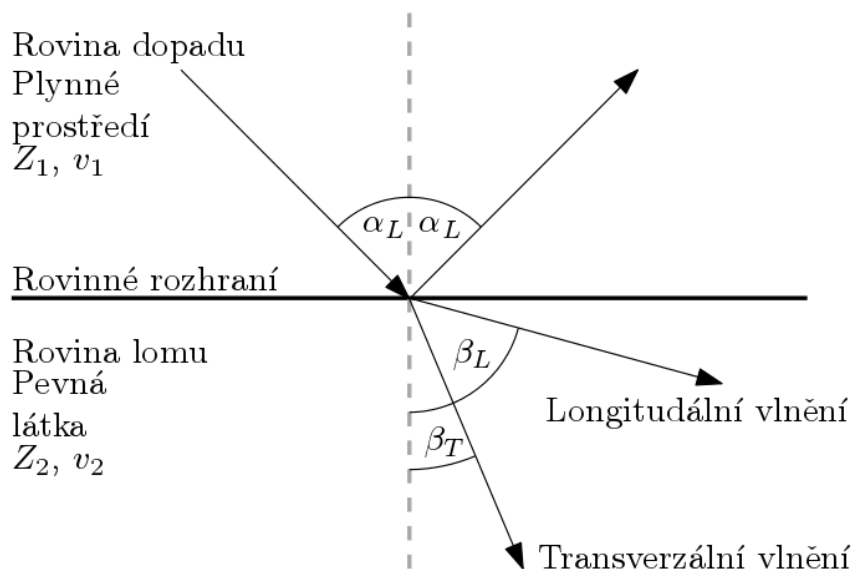
kde  $\rho$  je hustota prostředí a  $v$  je rychlost šíření zvuku v daném prostředí.

Při interakci vlnění s rozhraním je důležitá vlnová délka  $\lambda$ . V případě ultrazvuku s frekvencí 58 kHz šířícího se ve vzduchu je jeho vlnová délka dle rovnice 1.1 přibližně 0,59 cm. Pokud je překážka, na kterou vlnění dopadlo, mnohem menší než vlnová délka vlnění, dochází k rozptylu ultrazvuku, vlivem čehož se zvuk šíří mnoha různými směry [17]. Při srovnatelné velikosti překážky a vlnové délky dochází k ohybu, čímž se opět mění směr šíření vlny. Pokud je však překážka větší než vlnová délka vlnění, dochází na rozhraní mezi nimi k odrazu a lomu.

V této situaci závisí výsledek interakce na několika faktorech. Primárně jde o akustické impedance jednotlivých prostředí, protože pokud jsou stejné, nedojde k odrazu ani lomu. Jestliže jsou ale různé, pak je důležitý úhel dopadu vlnění, jenž se měří vzhledem ke kolmici k ploše rovinného rozhraní vztyčené v místě dopadu. Druh prostředí je také důležitý, jelikož při přechodech mezi kombinacemi plyných a kapalných prostředí nedochází ke vzniku příčného vlnění, ale v pevném prostředí vzniká i příčné vlnění, jež se odráží a láme pod jinými úhly než vlnění podélné, protože se i jinak rychle šíří. Snellův zákon popisuje vztah mezi úhly dopadu a odrazu a rychlostmi šíření zvuku v jednotlivých prostředích. Pro případ zobrazený na obr. 1.2, tedy pro přechod mezi plyným a pevným prostředím, je jeho znění následovné [5]:

$$\frac{\sin(\alpha_L)}{v_{1L}} = \frac{\sin(\beta_L)}{v_{2L}} = \frac{\sin(\beta_T)}{v_{2T}}, \quad (1.9)$$

kde úhly s indexem  $L$  náleží longitudální (podélným) vlněním a ty s indexem  $T$  příčným (transverzálním) vlněním. Index 1 a úhel dopadu nebo odrazu  $\alpha$  značí veličiny v rovině dopadu, kdežto index 2 a úhel lomu  $\beta$  značí veličiny v rovině lomu.



Obr. 1.2: Odraz a lom vlnění na rozhraní plyného a pevného prostředí [5]

Speciálním případem je kolmo dopadající vlna na rovinné rozhraní různých akustických impedancí. Při měření vzdálenosti ultrazvukem je tato situace žádoucí, jelikož se největší část dopadajícího vlnění odráží směrem zpět k vysílači. Pro tuto situaci je definován součinitel odrazu  $R$ , jenž říká, jaká procentuální část intenzity dopadajícího zvuku  $I_{\text{dopadající}}$  se odrazí směrem zpět ke zdroji s intenzitou  $I_{\text{odražená}}$ . Jeho definiční vztah je [17]:

$$R = \frac{I_{\text{odražená}}}{I_{\text{dopadající}}} \times 100 = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100 \quad [\%], \quad (1.10)$$

v němž  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou akustické impedance prostředí 1 resp. 2. Část vlnění ale také prostupuje do materiálu překážky. Součinitel průchodu  $D$  charakterizuje podíl intenzity vlnění, která pronikla do materiálu překážky, k intenzitě dopadajícího vlnění. Mezi oběma součiniteli platí vztah [5]:

$$D = 1 - R \quad [\%]. \quad (1.11)$$

Pro lepší představu o odrazu na rozhraní vzduch – pevná látka je užitečné vypočítat velikost součinitele odrazu například mezi vzduchem a polyvinylchloridem (PVC), jejichž akustické impedance pro podélné vlnění jsou  $Z_{\text{vzduch,L}} = 4,3 \times 10^3 \text{ kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}$  respektive  $Z_{\text{PVC,L}} = 3,27 \times 10^6 \text{ kg.s}^{-1}\text{m}^{-2}$  [1][17]. Po dosazení do rovnice 1.10 vychází velikost součinitele odrazu:

$$R = \left( \frac{4,3 \times 10^3 - 3,27 \times 10^6}{4,3 \times 10^3 + 3,27 \times 10^6} \right)^2 \times 100 = 99,475 \%, \quad (1.12)$$

neboli dochází k odrazu naprosté většiny ultrazvuku zpět ke zdroji. Tato situace je podobná na rozhraní vzduchu s většinou pevných látek i kapalin, což je dobré z hlediska jejich snadné detekce odraženým ultrazvukem, ale znesnadňuje to konstrukci zdrojů ultrazvuku (např. parkovacích senzorů), jenž musí být impedančně přizpůsobeny pomocí akustických transformátorů, aby do okolí vysílaly požadovaný výkon [17].

V průběhu šíření ultrazvuku prostředím dochází k jeho útlumu vlivem rozptylu na velmi malých částicích i vlivem absorpce v daném prostředí. Energie přenášená vlněním je především přeměňována na teplo. Každé prostředí je charakterizováno absorpčním koeficientem  $\alpha$ , který popisuje, jak snadno daným materiálem akustické vlnění prostupuje. Celkový útlum  $A$  v daném prostředí lze popsat rovnicí [3]:

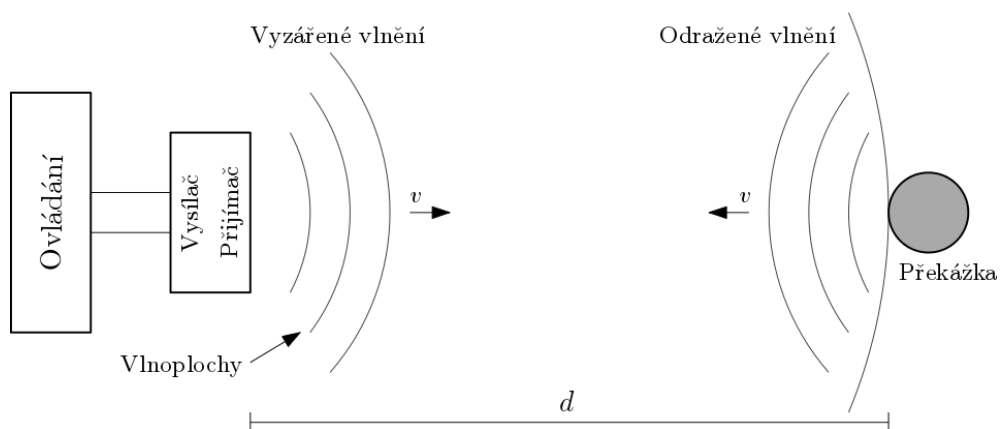
$$A = \alpha \times l \times f \quad [\text{dB}], \quad (1.13)$$

kde  $l$  je délka, na které je útlum v daném prostředí pozorován, a  $f$  je frekvence ultrazvuku. Z tohoto vztahu vyplývá, že není možné použít velmi vysoké frekvence ultrazvuku pro měření dlouhých vzdáleností. I u nižších frekvencí stále útlum roste se vzdáleností a omezuje tak maximální měřitelnou vzdálenost.



### 1.1.2 Základy měření vzdálenosti ultrazvukem

Principem ultrazvukového měření vzdálenosti je určení doby od vyzáření ultrazvukového signálu do přijetí zpětně odraženého signálu (takzvané echo). Tato doba bývá také označována zkratkou TOF (z anglického Time of Flight). Nejjednodušší způsob měření vzdálenosti ultrazvukem je zobrazen na obr. 1.3. Signál je vyzařován ze zdroje ultrazvuku, který je zároveň i jeho přijímačem, a cestuje prostorem rychlostí zvuku směrem k překážce. Od této překážky se část dopadajícího signálu odráží směrem zpět k vysílači. Ovládací obvody přídružené k přijímači ultrazvuku zaznamenají po detekci příchodu zpětně odraženého echa čas, jenž uplynul od počátku vysílání.



Obr. 1.3: Jednoduchý případ měření vzdálenosti ultrazvukem

Vzdálenost  $d$  mezi senzorem a překážkou lze následně vypočítat pomocí všeobecně známého vztahu pro výpočet dráhy:

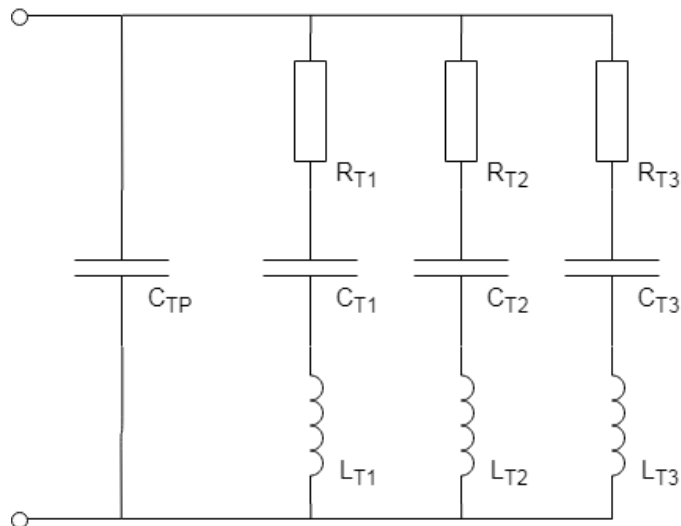
$$d = v \times \frac{t}{2} \quad [\text{m}], \quad (1.14)$$

do něhož se dosadí rychlost zvuku  $v$  a změřená doba mezi začátkem vysílání a příjmem signálu  $t$ . Čas  $t$  je v rovnici vydělen dvěma, jelikož kýženým údajem je pouze vzdálenost od vysílače k překážce a ne délka celé trajektorie, kterou ultrazvuk za změřený čas urazil. Aby mohla být úspěšně změřena vzdálenost k nějakému objektu, musí být od něj odražen dostatečně silný ultrazvukový signál, jenž je posléze zachycen přijímačem. Proto musí být objekt dostatečně velký a v rozumné vzdálenosti. Ultrazvukovými senzory využívanými v parkovacích asistentech je obvykle možné měřit do vzdálenosti v řádu jednotek metrů. Šikmé rampy a podobné překážky odrážející vlnění převážně do jiného směru než zpět k přijímači s velkou pravděpodobností nebudou při měření zachyceny. Existuje i nutná minimální vzdálenost k detekci překážky kvůli takzvané slepé nebo též mrtvé zóně, ve které není po vysílání stále rozkmitaný senzor schopen rozpoznat příchod odraženého signálu. Více informací o tomto jevu je uvedeno v následující podkapitole.

## 1.2 Piezoelektrický měnič a jeho vlastnosti

Jako zdroje i snímače ultrazvuku se v ultrazvukových parkovacích senzorech nejčastěji využívají piezoelektrické měniče fungující na základě piezoelektrického jevu. Jedná se o vlastnost některých materiálů, jejichž krystalická struktura nemá střed symetrie [12]. Existují dva druhy piezoelektrického jevu. Přímý piezoelektrický jev je možné pozorovat při mechanické deformaci krystalu, během které je krystalem generován elektrický náboj na jeho povrchu. Nepřímý piezoelektrický jev spočívá v definované mechanické deformaci krystalu za přítomnosti elektrického pole působícího na krystal. Mezi krystalické piezoelektrické materiály náleží například monokrystalický křemen, ale i zástupci z řad polovodičových materiálů (např. arsenid galia). Některé organické polymery (např. polyvinylchlorid) také vykazují piezoelektrické vlastnosti [12]. Pro průmyslové využití je však nejpodstatnější piezoelektrická keramika. Nejčastěji se využívá keramika PZT založená na olovu, zirkonu a titanu [21]. Hlavní výhodou keramiky je možnost její snadné výroby ve velkém množství a v požadovaných tvarech.

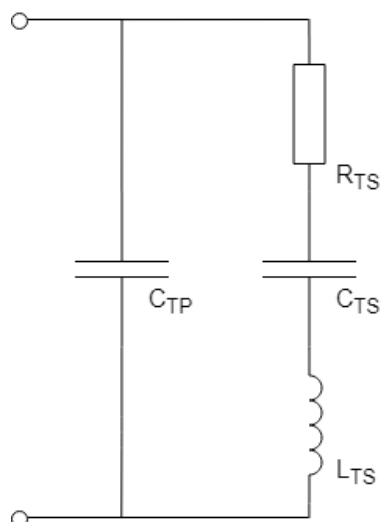
K realizaci vysílače ultrazvukového signálu se využívá nepřímý piezoelektrický jev. Na elektrody měniče je přiveden střídavý elektrický signál s dostatečnou amplitudou, jenž vlivem piezoelektrického jevu rozkmitává element z piezoelektrického materiálu. Ten svým kmitáním vyzařuje do okolí akustické vlnění se stejnou frekvencí, jakou má budící signál. Frekvence střídavého signálu má velký vliv na rozkmit elementu. Amplituda mechanických kmitů dosahuje maxima, pokud je budící frekvence střídavého signálu blízká mechanické rezonanční frekvenci měniče, což se projeví největší mírou vyzářené energie do okolí [18]. To se odráží i v náhradním schématu piezoelektrického měniče, které je zobrazeno na obr. 1.4. Z něj je patrné, že se měnič v obvodu chová jako rezonanční obvod, jehož jednotlivé rezonanční kmitočty určuje několik paralelně zapojených sériových rezonančních obvodů.



Obr. 1.4: Náhradní obvod piezoelektrického měniče [18]

Při aplikaci piezoelektrických měničů v parkovacích senzorech je obvykle využívána pouze jedna z rezonančních frekvencí měniče, která je udávána výrobcem, čímž se náhradní obvod zjednoduší do podoby zobrazené na obr. 1.5.

Rezonanční frekvence je určena sériovým rezonančním obvodem  $R_{TS}$ ,  $L_{TS}$ ,  $C_{TS}$ . Velikost kapacity kondenzátoru  $C_{TP}$  určuje především kapacita piezoelektrického elementu mezi dvěma elektrodami, která je také obvykle výrobcem udávána [18]. Díky svým vlastnostem se piezoelektrický měnič chová jako filtr typu pásmová propust s vysokou hodnotou činitele jakosti  $Q$  (to znamená velmi úzké propustné pásmo), jenž nejlépe propouští signál s frekvencí rovnou rezonanční frekvenci měniče.



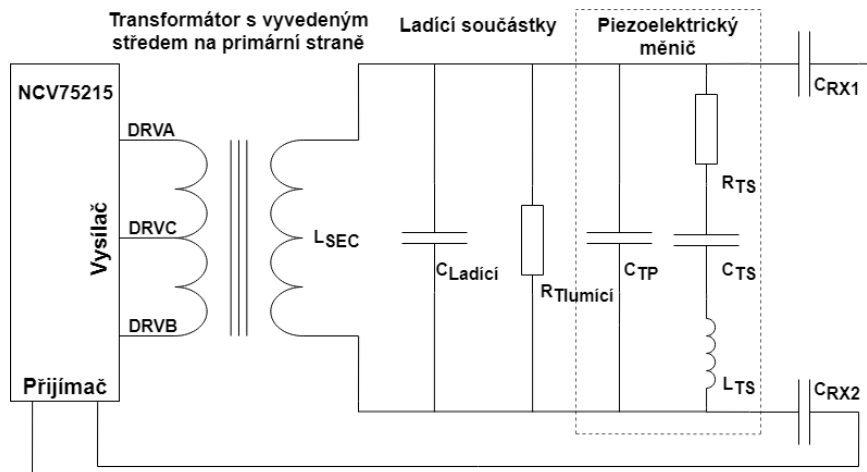
Obr. 1.5: Zjednodušený náhradní obvod piezoelektrického měniče s jednou rezonanční frekvencí [14]

Jeden piezoelektrický měnič může být při využití nepřímého i přímého piezoelektrického jevu jak vysílačem, tak i přijímačem ultrazvukového signálu. Takový systém se nazývá jednoduchý. V tomto systému je hlavním problémem tzv. doznívání mechanicky rozkmitaného měniče po konci buzení střídavým signálem. Během doby doznívání není možné rozpoznat, zda je signál na přijímači vytvářen právě samotným dozníváním měniče, nebo jde již o příchod odraženého signálu. Vynásobením poloviny doby doznívání rychlostí zvuku je získán údaj o nejkratší vzdálenosti od vysílače, ve které může být překážka vlivem doznívání detekována. Tato vzdálenost je také označována pojmem slepá nebo též mrtvá zóna a může se pohybovat v jednotkách až desítkách centimetrů [17]. Délku doby doznívání ve srovnání s dobou buzení měniče zachycuje obr. 1.8. Opakem jednoduchého systému je systém dvojitý, ve kterém je jeden piezoelektrický měnič dedikovaným vysílačem a druhý piezoelektrický měnič dedikovaným přijímačem. Oba měniče bývají umístěny v těsné blízkosti, což ale přináší nutnost dobré konstrukce přípravku tak, aby rozkmitaný vysílač při vysílání nepřenášel část vlnění přímo do přijímače například přes společnou desku plošných spojů. Velikou výhodou tohoto systému je fakt, že u přijímače neexistuje doba doznívání, neboť není buzen střídavým signálem. Díky tomu je možné detekovat překážku i v nepatrné vzdálenosti od přípravku s měniči. Nevýhodou je dvojnásobný počet měničů oproti systému jednoduchému a tedy i vyšší cena. Na obr. 1.6 je zachycena podoba obou možných řešení.



Obr. 1.6: Uzavřený piezoelektrický měnič připravený pro zabudování do nárazníku vozidla (vlevo) a dva otevřené měniče tvořící dvojité systém (vpravo)

Měniče se dále rozlišují na uzavřené a otevřené. U otevřeného měniče je piezoelektrický element přímo vystaven okolnímu prostředí, což omezuje možnost použití tohoto druhu měničů na vnitřní neprašné suché prostory. Oproti tomu uzavřené měniče mají piezoelektrický element hermeticky uzavřen v pouzdře, což zabraňuje jeho poškození vlivem přítomnosti cizích částic nebo vody. Kvůli zapouzdření je ale nutné tento druh měničů budit mnohem vyšší amplitudou střídavého napětí pro dosažení porovnatelného vyzařovaného výkonu (přes  $100\text{ V}_{\text{p-p}}$  viz obr. 1.8) [14]. I přes tuto nevýhodu se v automobilech využívají právě uzavřené měniče kvůli jejich odolnosti a vodotěsnosti. Obvyklým napájecím napětím v automobilech je  $12\text{ V}$  z autobaterie, proto se ke zvýšení napětí při buzení měničů často používají transformátory. Příklad možného zapojení piezoelektrického měniče do obvodu buzení přes transformátor integrovaným obvodem NCV75215 (viz kapitola 1.3) je uveden na obr. 1.7.



Obr. 1.7: Možné zapojení piezoelektrického měniče v obvodu obsahujícím integrovaný obvod NCV75215 [11]

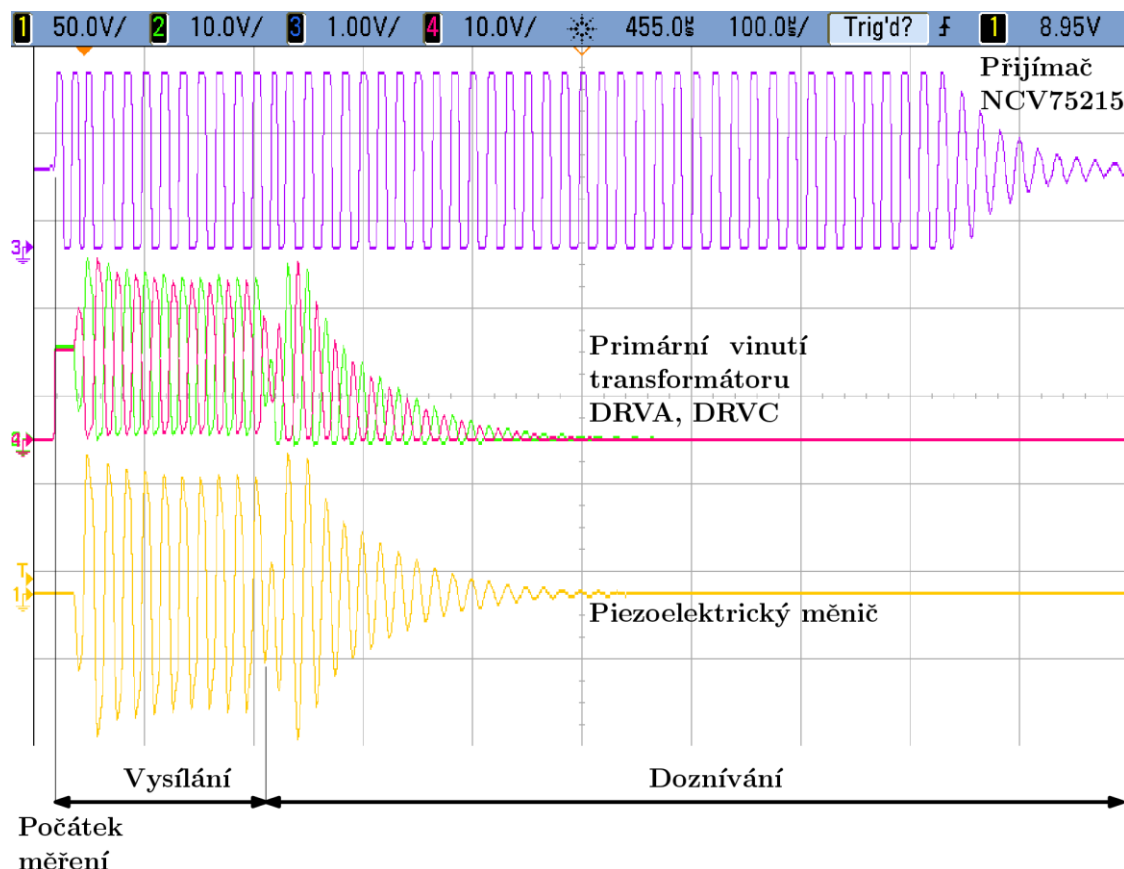
V daném obvodu vytváří indukčnost sekundárního vinutí transformátoru  $L_{sec}$  společně s kapacitou  $C_{TP}$  paralelní rezonanční obvod. Jeho rezonanční frekvence je zpravidla jiná, než je rezonanční frekvence piezoelektrického měniče, což ale není ideální stav. Pro dosažení nejkratšího možného času dozívání a nejvyššího vyzařovaného výkonu je zapotřebí upravit rezonanční frekvenci paralelního rezonančního obvodu na hodnotu stanovenou rezonanční frekvencí použitého piezoelektrického měniče [6]. K tomu je určen kondenzátor  $C_{Ladici}$ , jehož potřebnou kapacitu lze odvodit z Thomsonova vztahu:

$$f_{rez.} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sec}(C_{TP} + C_{Ladici})}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.15)$$

$$C_{Ladici} = \left[ \left( \frac{1}{2\pi \times f_{rez.}} \right)^2 \times \frac{1}{L_{sec}} \right] - C_{TP} \quad [\text{F}] \quad (1.16)$$

Ke zkrácení času dozívání slouží tlumicí rezistor  $R_{Tlumci}$ , jehož velikost je třeba doladit tak, aby byl obvod kriticky tlumen a po konci buzení tedy došlo k nejrychlejšímu možnému odeznění oscilací [6]. Možnou metodou ladění je také použití transformátoru s nastavitelnou indukčností sekundárního vinutí.

Na obr. 1.8 jsou zobrazeny průběhy napětí během buzení piezoelektrického měniče deseti pulsy vygenerovanými integrovaným obvodem NCV75215. Zeleně a červeně jsou na obrázku vyznačeny právě budící pulsy na primárním vinutí transformátoru (body DRVA a DRVB z obr. 1.7), žlutě je poté vyznačen průběh napětí na samotném měniči. Fialový průběh je zesílený signál z přijímače v čipu NCV75215, jenž byl vyveden na jeden z uživatelsky konfigurovatelných výstupů tohoto obvodu. Frekvence budících pulsů je 58kHz, což odpovídá rezonanční frekvenci připojeného piezoelektrického měniče. Z průběhů napětí na primárním vinutí transformátoru a na měniči je patrná hranice mezi ustálením buzení po uplynutí 10 pulsů a počátkem dozívání. Dozívání vypadá na první pohled relativně krátké, ale ze zesíleného signálu detekovaného přijímačem je naopak patrné, že doba dozívání je mnohem delší než samotné vysílání a na uvedeném obrázku trvá společně s vysíláním přibližně 1ms.



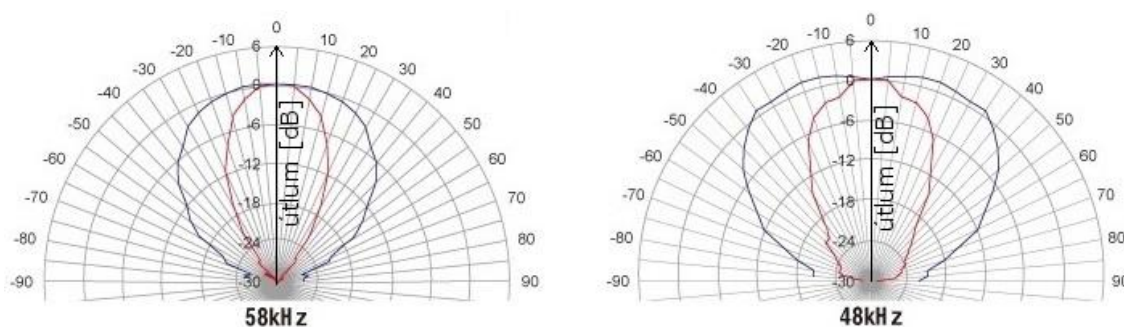
Obr. 1.8: Průběh napětí na piezoelektrickém měniči (žlutě), na primárním vinutí transformátoru (zeleně a červeně) a na výstupu přijímače (fialově) při buzení deseti pulsy

Větší množství budících pulsů dovoluje detekci překážek ve větších vzdálenostech kvůli zvýšení množství vyzařované energie z měniče. Nelze ale zvyšovat počet pulsů do nekonečna. Výrobce měničů udává maximální počet pulsů, jenž je možné vysílat daným měničem při určité amplitudě střídavého budícího napětí před plným vybuzením a saturací množství vyzařované energie. V této situaci měnič již není schopen v dané vzdálenosti vybudit větší hladinu akustického tlaku a další budící pulsy nebo zvyšování amplitudy napětí nejen že nepřinesou zvýšení vyzařované energie, ale mohou způsobit poškození samotného měniče například vlivem vznikajícího ztrátového tepla. Více vybuzený měnič bude mít také delší dobu doznívání a celé vysílání bude trvat delší dobu, proto je vhodné pouze pro zachycení vzdálenějších objektů.

### 1.2.1 Piezoelektrický měnič Murata MA58MF14-7N

Pro účely testování navržených algoritmů bylo zapotřebí reálné měření. Roli ultrazvukových parkovacích senzorů v něm sehrály měniče MA58MF14-7N od společnosti Murata. Tento měnič má rezonanční frekvenci 58 kHz, kterou by měl být při vysílání buzen pro dosažení nejvyššího vyzařovaného výkonu. Tento měnič lze budit maximálně 20 pulsy s hodnotou napětí  $120 V_{p-p}$ , ale při požadavku na nižší výkon a kratší dobu doznívání lze počet pulsů redukovat [9].

Jedním z nejdůležitějších parametrů každého měniče je kromě rezonanční frekvence jeho směrová vyzařovací charakteristika. Ta graficky znázorňuje závislost vysílaného výkonu na úhlu odklonu od osy daného měniče [22]. Na obr. 1.9 jsou znázorněny vyzařovací charakteristiky dvou piezoelektrických měničů od výrobce Murata, jenž se liší svou vyzařovací charakteristikou a rezonanční frekvencí. Zobrazený typ měniče s rezonanční frekvencí 58 kHz vlastnostmi odpovídá modelu MA58MF14- N.



Obr. 1.9: Vyzařovací charakteristiky měničů (červená = vertikální, modrá = horizontální) [20]

Z obr. 1.9 je patrné, že oba měniče mají asymetrické vyzařovací charakteristiky, jelikož horizontální a vertikální charakteristiky jsou různé. Vyzařovací úhel je výrobcem definován jako úhel mezi dvěma body, v nichž daná vyzařovací charakteristika protíná hranici útlumu -6 dB oproti přímému směru v ose měniče. Horizontální vyzařovací úhel 58 kHz modelu MA58MF14-7N je 80° a vertikální vyzařovací úhel je 34° [9]. U parkovacích senzorů je úzká vertikální vyzařovací charakteristika žádoucí, jelikož senzory bývají umístěny nízko nad zemí v nárazníku vozidla. Úzká vyzařovací charakteristika zamezí nechtěným odrazům od země nebo velmi nízkých překážek. Naopak široká horizontální vyzařovací charakteristika není v oblasti parkovacích senzorů na záadu, jelikož dovoluje pokrytí většího prostoru jedním senzorem.

### 1.3 Popis integrovaného obvodu NCV75215

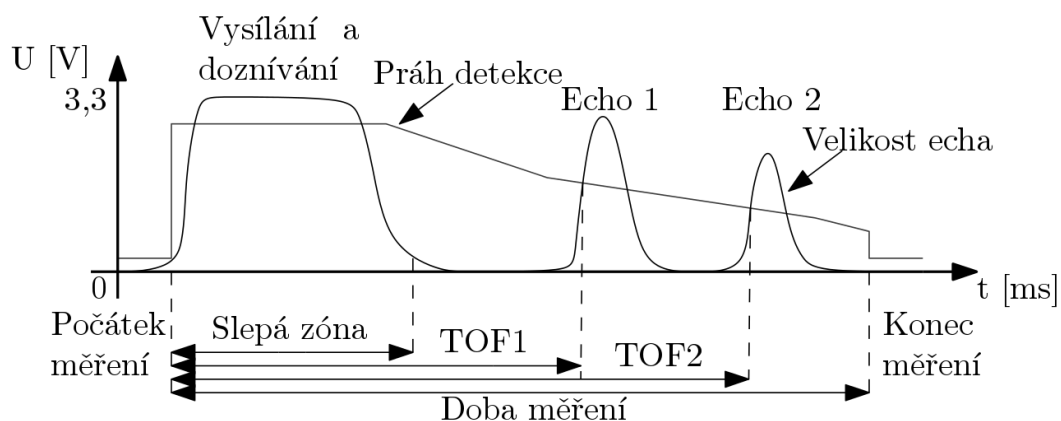
Velmi důležitou komponentou při ovládání piezoelektrických měničů je integrovaný obvod schopný řídit vysílání a příjem signálu a rovněž zpracovávat zachycené signály. V této práci je k tomuto účelu využit integrovaný obvod NCV75215 od společnosti ON Semiconductor, jenž je specificky určen pro aplikace v automobilových parkovacích asistentech a k ultrazvukovému měření vzdálenosti.

Obvod dokáže přes externí transformátor budit piezoelektrické měniče s rezonančními frekvencemi ležícími v rozsahu od 35 kHz do 90 kHz. Mimo jiné umožňuje také nastavit délku vysílání a výkon vysílaného ultrazvukového signálu pomocí řízení počtu budících pulsů i maximální hodnoty proudu tekoucího primárním vinutím transformátoru při buzení. Obvod obsahuje přijímač, u něhož je možné nastavit časově závislý práh detekce příchodu odrazu, jenž je zobrazen na obr. 1.10. Ke kompenzaci útlumu ultrazvuku při šíření ve vzduchu lze využít nastavitelnou časově závislou křivku zisku zesilovače umožňující zesílení přijatého signálu o 50 až 110 dB.

Pokud je práh detekce protnut již zesíleným přijatým signálem, může být vyvoláno uložení času, ve kterém tato situace nastala, do paměti obvodu. Tento čas se označuje již dříve zmiňovanou zkratkou TOF a v paměti jednoho obvodu mohou být uloženy maximálně dva časy. Vysílač a přijímač je aktivní pouze po dobu měření, kterou je možné nastavit až na  $60 \text{ m.s}^{-1}$ , což odpovídá vzdálenosti přibližně 10 m [11].

Nadřazené obvody mohou komunikovat s jednotlivými obvody NCV75215 přes sběrnici I/O Line, která se vyznačuje pouze jedním datovým vodičem a velkým rozdílem napětí reprezentujícího jednotlivé logické úrovně: logická '0' je reprezentována 0 V a logickou '1' reprezentuje napájecí napětí čipu (v automobilech typicky +12 V). Nevýhodou této sběrnice je neexistence adresování připojených čipů, takže ke každému obvodu musí být přiveden samostatný datový vodič [11].

Přijímač obvodu NCV75215 se skládá z několika důležitých bloků. Prvním je diferenční zesilovač zesilující signál z piezoelektrického měniče. Následuje zesilovač s proměnným zesílením, jež se mění dle nastavení časově závislé křivky zesílení. Posledním důležitým blokem je analogově digitální převodník, za kterým již následuje digitální zpracování signálu. Na konfigurovatelné výstupy čipu lze vyvést některé signály reprezentující křivky, se kterými probíhá digitální zpracování uvnitř obvodu. Například je možné vyvést signál poskytující informaci o tvaru křivky prahu detekce echa během měření nebo křivku reprezentující velikost zachyceného echa. Obě tyto křivky jsou zobrazeny na obr. 1.10.



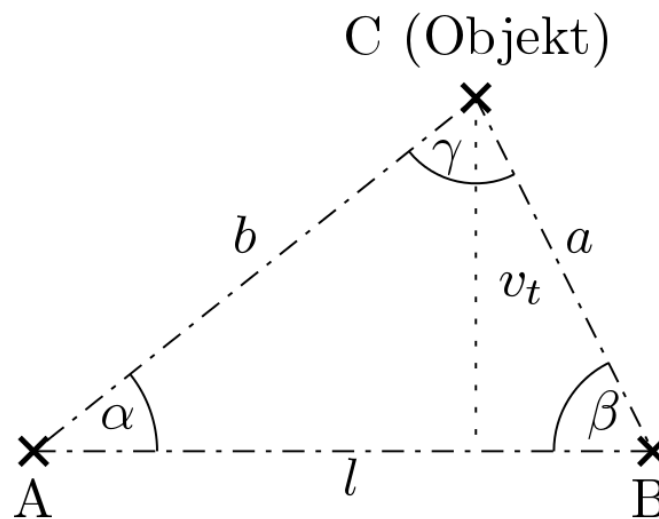
Obr. 1.10: Zjednodušené průběhy signálů na konfigurovatelných výstupech obvodu NCV75215 během vysílání a následného příjmu odražených signálů

V okamžiku kdy čip vyhodnotí, že velikost přijatého echa přesáhla nastavený práh detekce, může dojít zaznamenání uplynutého času od počátku měření, ale i k oznámení zachycení echa na sběrnici I/O Line nadřazenému obvodu. Obě metody budou využity při implementaci algoritmů vytvořených v kapitole 2.



## 1.4 Princip triangulace a trilaterace

Triangulace i trilaterace jsou postupy, jimiž je možné určit souřadnice objektu v rovině. Triangulace spočívá v určení všech tří vnitřních úhlů v pomyslném trojúhelníku, jehož vrcholy jsou tvořeny objektem a dvěma body, ve kterých je uskutečněno měření. Možné rozložení bodů při triangulaci je vyobrazeno na obr. 1.11. V bodech A i B, v nichž probíhá měření, je nejprve nutné změřit úhel mezi jejich spojnicí a polopřímku vycházející z daného bodu a směřující k objektu, tedy do bodu C. Protože je součet všech vnitřních úhlů v trojúhelníku je roven  $180^\circ$ , není nutné měřit zbývajících úhel  $\gamma$ , ale jeho velikost lze získat odečtením součtu velikostí úhlů  $\alpha$  a  $\beta$  od  $180^\circ$ .



Obr. 1.11: Zjištění polohy objektu triangulací

Další postup vychází ze znalosti sinové věty, jež by pro případ z obr. 1.11 měla tvar:

$$\frac{\sin(\alpha)}{a} = \frac{\sin(\beta)}{b} = \frac{\sin(\gamma)}{l}. \quad (1.17)$$

Důležitým předpokladem pro následující výpočty je znalost vzdálenosti mezi měřicími body  $l$ . Pokud je tato podmínka splněna, je možné si z rovnice 1.17 postupně vyjádřit vzdálenosti od bodů A i B a také výšku trojúhelníku  $v_t$ , čili nejmenší vzdálenost objektu od spojnice měřicích bodů. Pokud se měřiče v bodech A i B nahradí parkovacími senzory a spojnice mezi nimi již není pouze imaginární, ale tvoří ji nárazník vozidla, je právě informace o výšce  $v_t$  pro řidiče velmi důležitá. V tomto případě je její velikost možno určit pomocí funkce sinus následovně:

$$v_t = \sin(\alpha) \times b \quad [\text{m}]. \quad (1.18)$$

Triangulace byla dříve využívána z důvodu obtížnosti rychle a snadno měřit vzdálenosti, což se s nástupem moderních přístrojů změnilo. V dnešní době je velice často používána trilaterace založená na měření vzdáleností. Jedním z nejvýznamnějších využití této metody pro navigační účely je její aplikace v družicovém globálním polohovém systému (GPS) [19]. Situace není příliš odlišná od té zobrazené na obr. 1.11,

ale místo měřičů úhlu jsou v bodech A i B umístěny měřiče vzdálenosti. K zjištění velikostí stran trojúhelníku již není zapotřebí přepočít pomocí sinové věty. K měření vzdálenosti se nejčastěji využívá měření času, za který danou vzdálenost urazí např. světelný paprsek (laser), rádiový signál nebo právě ultrazvuk, jenž je posléze přepočten na vzdálenost přes rychlost šíření daného signálu v daném prostředí.

## **1.5 Rozšířené systémy parkovacích asistentů**

Parkovací asistenty slouží k usnadnění parkovacích manévřů a k omezení počtu nehod, které nastanou při parkování vozidel. Jejich základní funkcí je určování vzdálenosti k překážce, ke které se vozidlo přibližuje. Systémy parkovacích asistentů od různých výrobců se však svými schopnostmi výrazně liší. Odlišný může být počet a druh senzorů, jejich doporučené umístění a především způsob komunikace s řidičem. V této kapitole bude rozebráno několik druhů asistentů, se kterými je možné se setkat v dnešních vozidlech.

### **1.5.1 Elektromagnetické parkovací asistenty**

Implementace parkovacích senzorů založených na piezoelektrických měničích přináší nutnost jejich zabudování do nárazníku vozidla vyvrtáním několika otvorů. Elektromagnetické parkovací asistenty nevyužívají ultrazvukové senzory. Namísto nich je využito elektromagnetické vlnění vyzařované z antény schované za nárazníkem vozidla, takže není narušen jeho vzhled. Tento systém má ale řadu nevýhod. Oproti systémům využívajícím ultrazvuk je nejmenší měřitelná vzdálenost větší. Navíc systém zachytí pouze pohybující se překážky nebo vozidla [4]. Mnohem rozšířenější jsou parkovací asistenty založené na využití ultrazvukových piezoelektrických měničů pracujících s akustickými signály s frekvencemi v řádu desítek kilohertzů, o kterých pojednávají následující podkapitoly.

### **1.5.2 Systém s akustickou signalizací**

Nejjednodušší parkovací asistent, jenž po aktivaci komunikuje s řidičem vozidla pomocí akustických signálů. Proměnlivá délka vydávaného tónu poskytuje informaci o vzdálenosti nejbližší překážky. Při přibližování objektu se délka tónu zvyšuje, až se nakonec při značném přiblížení promění v trvalý zvukový signál. Jednotlivé hranice přechodů mezi délkami tónu jsou obvykle již předem určeny výrobcem zařízení.

Výhodou tohoto systému je absence displeje, čili i nižší cena a snazší montáž. Řidič také není nucen přenášet svoji pozornost od zpětných zrcátek k displeji, ze kterého by musel odečítat vzdálenost překážky. Značnou nevýhodou však je nemožnost určení směru, ve kterém detekovaná překážka leží.

### 1.5.3 Systém s indikací vzdálenosti překážky a přibližné pozice

K indikaci pozice nejčastěji slouží displeje, již jsou buďto samostatné, nebo jsou součástí výbavy automobilu. Akustická signalizace vzdálenosti bývá přítomna i v těchto systémech, ale pro získání informace o pozici překážky se řidič musí podívat na displej, jenž může mít různá provedení. Jedno z nich je zachyceno na obr. 1.12. Není obvyklé, že by tyto systémy ukázaly přesnou polohu objektu za vozidlem. Jednodušší z nich dovedou sledovat jednu překážku a na displeji signalizovat, zda se nachází vpravo nebo vlevo od vozidla. Její vzdálenost je buďto pouze uvedena číselně, nebo je znázorněna pomocí rozsvícení segmentů displeje. O něco vyspělejší systémy umí zobrazit pozici překážky v jedné z několika zón před jednotlivými senzory.



Obr. 1.12: Parkovací asistent s ukazatelem přibližné polohy překážky 0

### 1.5.4 Kombinované systémy se senzory a parkovací kamerou

Parkovací kamery umístěné v zadní části vozidla výrazně přispívají bezpečnosti, jelikož vidí i překážky, jež by pouze parkovací senzory nezaznamenaly. Takovými překážkami jsou například ploty tvořené velmi tenkým pletivem, zaoblené, tenké nebo šikmé překážky (např. rampy), jež neodráží dostatek ultrazvuku zpět k senzorům. Velmi nízké překážky ležící mimo detekční zónu snímačů mohou být také v některých situacích problematické. Na druhou stranu tyto kamery kvůli širokoúhlému objektivu značně zkreslují, a tak je obtížné spolehlivě odhadnout vzdálenost k objektům.

Kombinací s parkovacími senzory získává tento systém možnost řidiče rychle akusticky informovat o blížící se překážce. V případě špatných světelných podmínek nebo v podmínkách, v nichž kamera není schopna poskytnout dostatečně kvalitní obraz, přejímají ultrazvukové senzory hlavní roli parkovacího asistentu.

### **1.5.5 Aktivní parkovací asistenty**

V současnosti automobilky nabízejí aktivní nebo také automatické či poloautomatické parkovací asistenty. Sada ultrazvukových parkovacích senzorů v předním i zadním nárazníku je v tomto systému doplněna přídatnými senzory mířícími do stran vozidla, které mají za úkol, pokud je tato funkce aktivována, najít parkovací místo dostatečně velké pro dané vozidlo. Do tohoto místa je posléze automobil schopen sám podélně nebo i příčně zaparkovat s minimálními zásahy řidiče (např. pouze řazení) nebo i bez nich [8].

## 2 NÁVRH ALGORITMŮ

Cílem této kapitoly je navržení takového algoritmu, po jehož implementaci do řídicího softwaru by bylo možné určit polohu objektu v oblasti před několika piezoelektrickými měniči (ultrazvukovými parkovacími senzory). Oproti používaným parkovacím asistentům analyzovaným v kapitole 1.5 nebude výsledný přípravek akusticky signalizovat vzdálenost, ale mělo by dojít k zobrazení polohy ve zvolené souřadnicové síti a vypsání důležitých vzdáleností nutných pro provedení trilaterace. Důraz také bude kladen na možnost detekce více než jedné překážky před senzory, čímž by se algoritmus měl odlišovat od mnoha parkovacích asistentů na trhu. Ve veřejných zdrojích není téměř možné dohledat, jakým způsobem postupují výrobci těchto asistentů při určování polohy objektů, proto je nutné navrhnout celý algoritmus od základu.

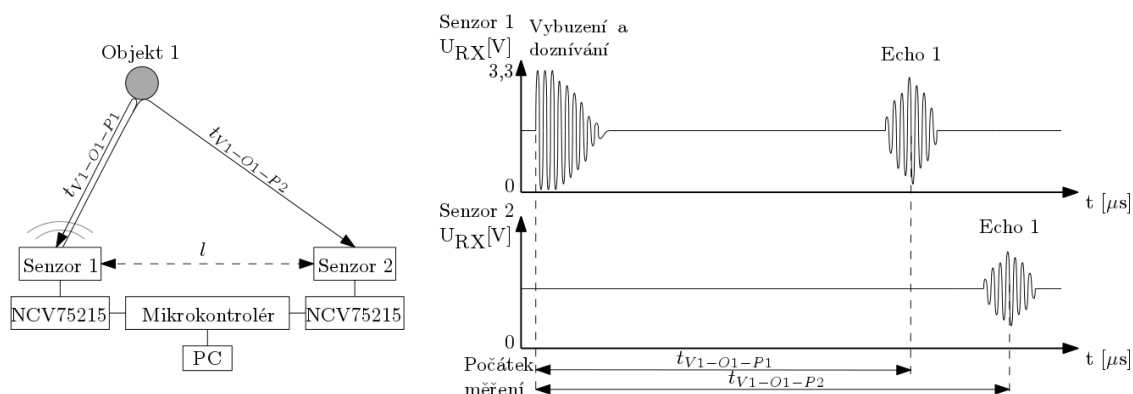
### 2.1 Základní lokalizace jedné překážky s využitím dvou ultrazvukových senzorů

S využitím pouze jednoho parkovacího senzoru není možné zjistit přesnou polohu objektu od senzoru, ale pouze vzdálenost k objektu. To je důsledkem toho, že piezoelektrický měnič vyzařuje ultrazvuk do poměrně široké oblasti a je tedy nemožné určit, ze kterého směru odražený signál přišel. To je nevýhodou oproti systémům využívajícím fokusovaný zdroj signálu pro měření vzdálenosti. Takovým systémem je například LiDAR využívající laser. Aby bylo možné ultrazvukem určit nejen vzdálenost, ale i přesnou polohu objektu, jsou nutné nejméně dva ultrazvukové měniče.

Pouze dva parkovací senzory se v automobilech obvykle nepoužívají, ale toto zapojení je klíčové pro budoucí nástavby, a proto je jeho správná funkce velmi důležitá. Nejjednodušší situace nastává za předpokladu, že se v oblasti před snímači vyskytuje pouze jedna překážka. Tou může být například tyč o dostatečném průměru a výšce. Překážka nesmí být příliš blízko k snímačům, poněvadž by odraz od ní mohl zasahovat do mrtvé zóny vysílače, ale ani příliš daleko, jelikož ve velkých vzdálenostech je útlum ultrazvuku značný a po odrazu by ani zesílené echo již nemuselo být spolehlivě zaznamenáno.

Možné umístění parkovacích senzorů a překážky, jež bude dále popisováno, je zachyceno na obr. 2.1, stejně tak jako průběhy signálů zachycených na přijímačích v obvodech NCV75215 připojených k oběma měničům. Senzory jsou fixovány například v nárazníku vozidla a vzájemně jsou vzdáleny známou vzdáleností  $l$ . Před zahájením měření je řídicími obvody NCV75215 jeden ze senzorů, v tomto případě senzor 1, nastaven do vysílacího režimu, kdežto senzor 2 je nastaven jako přijímač. Přijímač není na rozdíl od vysílače po začátku měření buzen, pouze jsou aktivovány obvody zaznamenávající příchod. Vzhledem k tomu že signály vysílané jednotlivými senzory se ničím výrazně neliší, není možné, aby během jednoho měření byly oba senzory vysílačem. V takovém případě by nebylo možné rozpoznat, který ze senzorů byl zdrojem zpětně odraženého signálu a přepočít zachycených časů na vzdálenosti by nebyl možný. Použitá konfigurace měničů dovozuje změření všech potřebných vzdáleností k provedení trilaterace během jednoho měření.

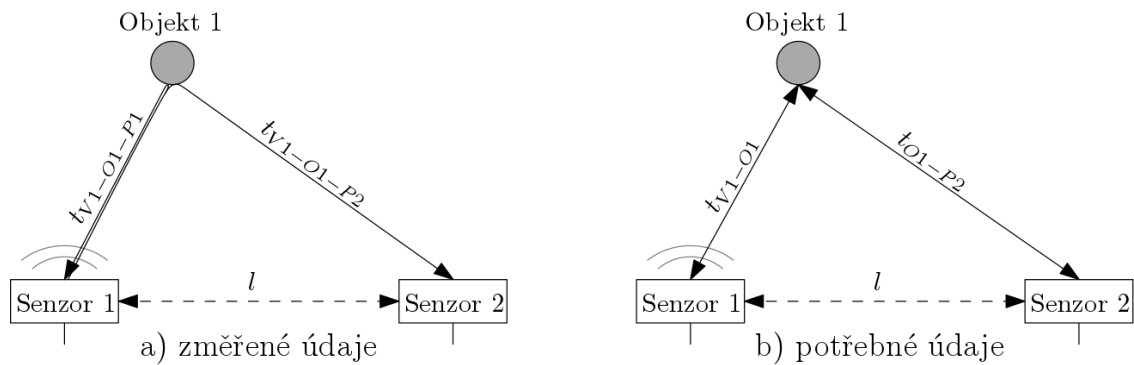
V okamžiku počátku vysílání je současně zahájeno měření času v obou ovládacích obvodech. Vyslaný ultrazvukový signál se při interakci s překážkou mimo jiné odráží směrem zpět k senzoru 1, jenž je po ukončení vysílání a odeznění dozívání schopný opět přijímat ultrazvukové vlnění. Část vlnění se odráží i k senzoru 2. Čas příchodu odražených signálů do senzoru 1 a 2 se zaznamená v přiřazených řídicích obvodech.



Obr. 2.1: Měření vzdálenosti jedné překážky dvěma senzory – rozmístění senzorů a signály na přijímačích přiřazených k jednotlivým senzorům

Po skončení měření nastává fáze zpracování dat. Pro účely objasnění funkce algoritmu a jednodušší orientaci ve vzorcích budou v dalších částech práce používány následující indexy popisující trajektorii ultrazvukového vlnění od jeho vyzáření po zpětný příchod do některého ze senzorů:  $V_x$  (vysílač  $x$ ),  $O_x$  (objekt  $x$ ) a  $P_x$  (přijímač  $x$ ). Index  $V1$  tedy označuje, že vysílačem při změření daného času byl senzor 1. Jestliže se ultrazvuk při šíření prostorem odrazil od objektu 1, bude označen indexem  $O1$ . Přijetí signálu senzorem 1 přidá zaznamenanému času index  $P1$ . Příkladem je situace na obr. 2.1, ve které byl jediným vysílačem signálu senzor 1, tedy oba zaznamenané časy mají index  $V1$ . Jediným objektem, od kterého se ultrazvuk mohl odrazit, byl objekt 1, proto mají oba zaznamenané časy také index  $O1$ . Čas zaznamenaný po příchodu echa do senzoru 1 je označen indexem  $P1$  a analogicky čas zaznamenaný senzorem 2 obdrží index  $P2$ .

Časy zaznamenané pomocí senzorů není možné jednoduše přepočítat na vzdálenost vynásobením rychlostí zvuku. Nejprve je nutné z nich vypočítat čas, za který ultrazvuk dorazil od objektu k jednotlivým senzorům, aby pak tyto časy mohly být převedeny na korektní vzdálenosti, což je ilustrováno na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Rozdíl mezi změřenými časy a časy potřebnými pro přepočet na vzdálenosti

Senzor 1, který byl při vysílání zdrojem ultrazvukového signálu, změří čas, za který ultrazvuk urazí vzdálenost od vysílače k objektu a zpět. Zaznamenaný čas je tedy dvojnásobkem času potřebného pro přepočet na korektní vzdálenost, jenž se vypočte pomocí vztahu:

$$t_{V1-O1} = \frac{t_{V1-O1-P1}}{2} \quad [\text{s}]. \quad (2.1)$$

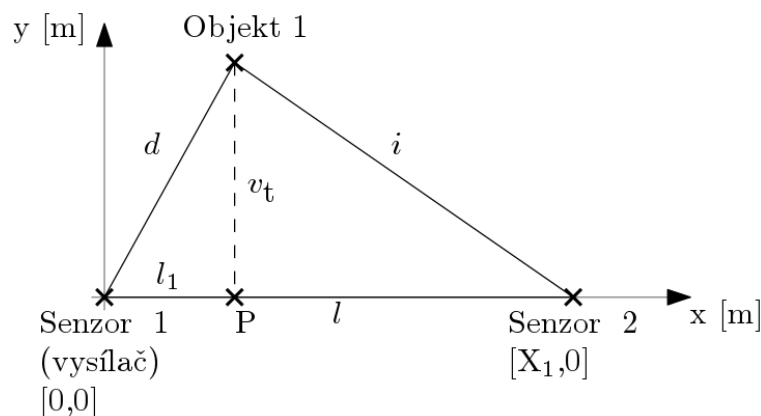
Pro zjednodušení je uvažováno, že místo odrazu ultrazvuku směrem k senzoru 2 je stejné, jako místo odrazu ultrazvuku směrem zpět k senzoru 1. Poté se dá říci, že při cestě k senzoru 2 nejprve ultrazvuk opět urazí cestu mezi vysílačem a objektem za dobu  $t_{V1-O1}$ , ale po odrazu ještě signál cestuje k senzoru 2 po dobu  $t_{O1-P2}$ . Z paměti přiřazené k senzoru 2 tudíž bude vyčteno TOF odpovídající času  $t_{V1-O1-P2}$  složeného ze součtu těchto dvou časů:

$$t_{V1-O1-P2} = t_{V1-O1} + t_{O1-P2} \quad [\text{s}]. \quad (2.2)$$

K získání potřebného údaje  $t_{O1-P2}$  tedy pouze stačí od změřeného času odečíst čas, za který ultrazvuk urazil dráhu mezi vysílačem a objektem, což odpovídá hodnotě získané z rovnice 2.1. Výsledný tvar rovnice je:

$$t_{O1-P2} = t_{V1-O1-P2} - t_{V1-O1} = t_{V1-O1-P2} - \frac{t_{V1-O1-P1}}{2} \quad [\text{s}]. \quad (2.3)$$

K zobrazení polohy překážky v rovině je vhodné zavést systém souřadnic, do kterého budou umístěny jednotlivé senzory i lokalizovaný objekt. Ve zvolené podobě souřadnicového systému zobrazené na obr. 2.3 je senzor 1 umístěn v počátku souřadnic a druhý senzor se nachází na souřadnicích  $[X_1, 0]$ . Část osy x mezi senzory tvoří pomyslný nárazník vozidla, ve kterém by tyto ultrazvukové senzory byly umístěny.



Obr. 2.3: Výpočet polohy překážky v prostoru

Konverze na vzdálenosti potřebné k provedení trilaterace nejprve začne výpočtem vzdálenosti mezi vysílačem (senzorem 1) a překážkou. Na obr. 2.3 se jedná o stranu  $d$  a k výpočtu její velikosti lze využít základní rovnici pro výpočet dráhy:

$$d = t \times v = t_{V1-O1} \times v = \frac{t_{V1-O1-P1}}{2} \times v \quad [\text{m}]. \quad (2.4)$$

Vzdálenost  $d$  od senzoru, jenž byl nejprve v režimu vysílače a po odvysílání signálu se z něj stal přijímač, není dle rovnice 2.4 závislá na ničem jiném než na času od počátku vysílání signálu do jeho zpětného přijetí změřeném samotným senzorem a rychlosti zvuku. Proto se tento režim nazývá režimem přímého měření (z anglického direct measurement mode). Vzdálenost změřená senzorem v tomto režimu bude také označována jako přímo měřená vzdálenost.

Výpočet vzdálenosti mezi senzorem 2, jenž pouze čekal na přijetí odraženého signálu, a překážkou, je složitější. Doba  $t_{V1-O1-P2}$  do přijetí signálu tímto snímačem odpovídá součtu doby od vyslání signálu do jeho odrazu a doby od odrazu signálu do přijetí tímto senzorem. Pro získání vzdálenosti  $i$  z obr. 2.3, je nutné znát čas  $t_{O1-P2}$ , za který ultrazvuk urazí vzdálenost mezi překážkou a senzorem 2. K zjištění tohoto času je nutné odečíst od změřené doby  $t_{V1-O1-P2}$  dobu  $t_{V1-O1}$  změřenou senzorem v režimu vysílače dle rovnice 2.3. Výsledek se opět dosadí vzorce pro výpočet dráhy:

$$i = t \times v = t_{O1-P2} \times v = (t_{V1-O1-P2} - \frac{t_{V1-O1-P1}}{2}) \times v \quad [\text{m}]. \quad (2.5)$$

Vzdálenost  $i$  od překážky k senzoru, jenž byl po celou dobu pouze přijímačem je dle rovnice 2.5 závislá nejen na času změřeném tímto senzorem, ale i na času změřeném dalším senzorem, který sehrál roli vysílače. Proto se tento režim nazývá režim nepřímého měření (z anglického indirect measurement mode) a takto zjištěná vzdálenost je nepřímou měřenou vzdáleností.



Výšku  $v_t$  pomyslného trojúhelníku (souřadnici překážky na ose y), lze v daném souřadnicovém systému (viz obr. 2.3) určit pomocí Pythagorovy věty, jež má tvar:

$$v_t = \pm \sqrt{d^2 - l_1^2} \quad [\text{m}], \quad (2.6)$$

kde  $l_1$  je vzdálenost od počátku souřadnic (bod  $[0, 0]$  - umístění senzoru 1) k bodu P (pata výšky). Tuto rovnici je možné vypočítat ze dvou pravoúhlých trojúhelníků tvořených vrcholy *Senzor 1 – P – Objekt 1* a *Senzor 2 – Objekt 1 – P*. Pro každý z nich lze s využitím Pythagorovy věty zapsat rovnice:

$$l_1^2 + v_t^2 = d^2 \quad [\text{m}] \quad (2.7)$$

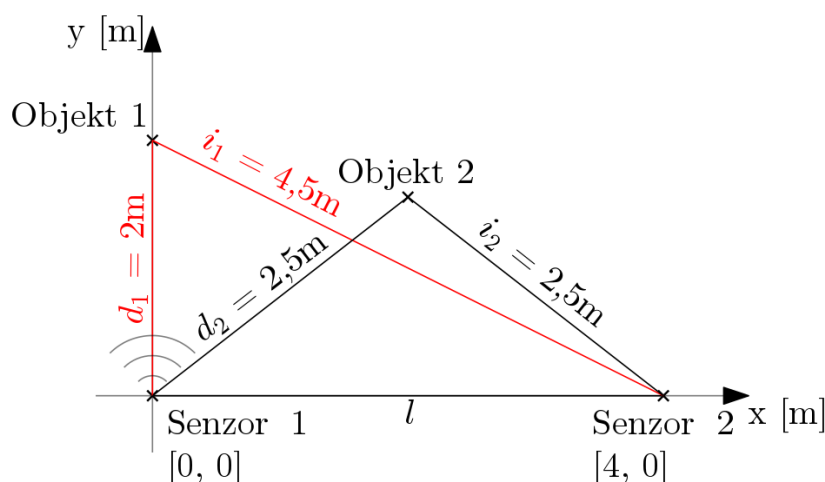
$$(l - l_1)^2 + v_t^2 = i^2 \quad [\text{m}]. \quad (2.8)$$

Z této soustavy dvou rovnic je již možné vyjádřit vzdálenost  $l_1$  (souřadnice překážky na ose x). Tato vzdálenost odpovídá vzdálenosti mezi počátkem souřadnic a patou výšky P. Výsledný vztah je:

$$l_1 = \frac{d^2 - i^2 + l^2}{2 \times l} \quad [\text{m}]. \quad (2.9)$$

Pata výšky bude vždy ležet na ose x a dokud se pohybuje v rozmezí mezi body vymezenými senzory 1 a 2, tak určuje i nejkratší vzdálenost mezi překážkou a pomyslným nárazníkem vozidla. Vzhledem k typickým tvarům vyzařovacích charakteristik senzorů (viz kapitola 1.2.1) se nepředpokládá úspěšné zachycení příliš mnoha objektů, které by se nacházely blízko nárazníku vozidla a zároveň mimo oblast vymezenou dvěma senzory. Vypočtené vrcholy mají souřadnice  $O[l_1, v_t]$  a  $O'[l_1, -v_t]$ . Bod  $O'$  je možné vyloučit, protože detekovaný objekt nemůže ležet v oblasti za senzory.

Problémem tohoto způsobu lokalizace je předpoklad přítomnosti pouze jedné překážky před senzory. Za přítomnosti více objektů může snadno dojít k určení pozice neexistující překážky. Příklad takové situace je zachycen na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Problém s lokalizací objektu za přítomnosti více překážek

The diagram illustrates a 2D coordinate system with a horizontal x-axis and a vertical y-axis. The x-axis is labeled 'x [m]' at its right end, and the y-axis is labeled 'y [m]' at its top end. Two sensors are positioned on the x-axis: 'Senzor 1' at the origin  $[0, 0]$  and 'Senzor 2' at  $[4, 0]$ . A point 'P' is marked on the x-axis at  $[1, 375, 0]$ . A dashed vertical line connects point P to a point labeled 'Vypočtená poloha' (Calculated position) in the first quadrant. This calculated position is also labeled 'Objekt 2'. The distance from Senzor 1 to the calculated position is labeled  $d = 2\text{m}$ . The distance from Senzor 2 to the calculated position is labeled  $i = 3\text{m}$ . The vertical distance from the x-axis to the calculated position is labeled  $v_t = 1,453\text{m}$ . The horizontal distance from Senzor 1 to point P is labeled  $l_1$ , and the horizontal distance from point P to Senzor 2 is labeled  $l$ . An additional label 'Objekt 1' is placed near the y-axis, with a small 'x' mark on the y-axis.

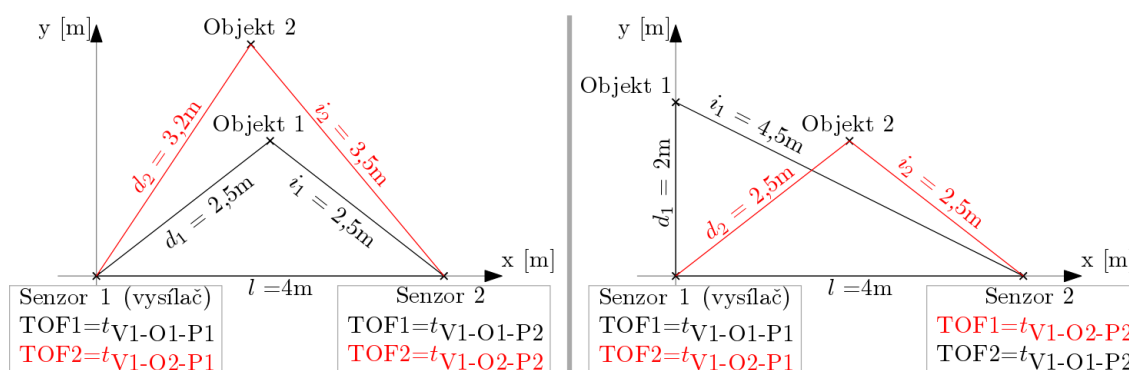
Vypočtené souřadnice překážky z obr. 2.5 by v takovém případě neodpovídaly pozici ani jednoho z objektů. Detekce falešných překážek není v žádné aplikaci žádoucím jevem, proto je nutné zavést takový algoritmus, jenž se nenechá zmást přítomností více než jednoho objektu před senzory a případně dovolí současně lokalizovat i více než jeden objekt.

## 2.2 Lokalizace dvou překážek s využitím dvou ultrazvukových senzorů

V předchozí kapitole byl popsán problém s nalezením pozice objektu, pokud je před ultrazvukovými parkovacími senzory více než jedna překážka. V této kapitole bude tento problém řešen společně s návrhem způsobu lokalizace dvou objektů současně.

Jedním z problémů diskutovaných v předchozí kapitole byl nedostatek údajů pro možné provedení trilaterace. Samotné obvody NCV75215 umožňují ukládání prvního i druhého zachyceného času příchodu echa (TOF1 a TOF2), což postačuje pro určení pozice dvou překážek pomocí dvou senzorů. I kdyby obvody touto pamětí nedisponovaly, je možné nastavit oznámení detekce příchodu echa na komunikační sběrnici I/O Line a uložit čas od počátku měření v jiném nadřazeném systému. Využitím druhého zachyceného echa je vyřešen problém s počtem změřených údajů potřebných k lokalizaci dvou překážek, ale zbývá problém s jejich vzájemným přiřazením.

Jak již bylo uvedeno dříve, k určení pozice objektu je nutné znát alespoň dvě vzdálenosti od tohoto objektu k pevně umístěným senzorům. Nezáleží, jestli jsou tyto vzdálenosti měřeny v přímém nebo v nepřímém režimu měření, ale pro korektní výsledek musí být jistota v tom, že obě vzdálenosti jsou měřeny skutečně od stejného objektu. V minulé kapitole byl problémem nejen nedostatek změřených údajů, ale i to, že při výpočtu nepřímě měřené vzdálenosti došlo k odečtení času, za který ultrazvuk urazil vzdálenost od vysílače k objektu X od času, který urazil ultrazvuk od vysílače k objektu Y a poté k přijímači. Výsledná vzdálenost byla nekorektní, protože spolu tyto dva časy nesouvisí, jelikož jsou vztaheny k různým objektům. Správné vzájemné přiřazení časů zachycených senzorem v režimu vysílače k časům zachycených senzorem v režimu přijímače je nutností k určení korektních vzdáleností měřených v nepřímém režimu. Za přítomnosti dvou překážek a měření dvou časů příchodu echa každým senzorem se mohou vyskytnout dvě různé kombinace možného vzájemného přiřazení zachycených časů TOF, jež jsou zobrazeny na obr. 2.6. K sobě náležející kombinace jsou znázorněny stejnou barvou.



Obr. 2.6: Možné kombinace časů příchodu odražených signálů od dvou překážek

Způsob, kterým bylo vyřešeno rozpoznání správně vypočtené vzdálenosti změřené senzorem v režimu přijímače, je založen na následující myšlence. Pokud byla vzdálenost vypočítána korektně, bude v dalším měření, ve kterém se ale z přijímače stane vysílač, změřena stejným senzorem přibližně stejná vzdálenost. Aby bylo potvrzeno, že jde opravdu o tu stejnou překážku, musí být i vzdálenost změřená senzorem, jenž v předchozím měření sehrál roli vysílače, shodná s tou, jenž naměří v druhém ověřovacím měření v opačné konfiguraci. Každá vzdálenost, se kterou se posléze provede trilaterace, tedy musí být změřena dvakrát ve dvou po sobě jdoucích měřeních, aby mohla být považována za potvrzenou. Tyto dvě měření by měly být provedeny co nejrychleji po sobě, aby bylo možné zachytit i pomalu se pohybující překážky. K určení pozice objektu není možné použít pouze přímo měřené vzdálenosti ze dvou měření. Ty jsou sice vždy korektní, jelikož nevyžadují složitější přepočty, ale samy o sobě neumožňují provázání mezi jednotlivými měřeními a tedy i určení, že je ve dvou různých měřeních měřena vzdálenost skutečně k té samé překážce. Při posuzování shody mezi naměřenými vzdálenostmi samozřejmě musí existovat toleranční pásmo, protože v reálných podmínkách ovlivňuje přesnost měření mnoho faktorů (například různá místa odrazu ultrazvuku od stejné překážky k jednotlivým senzorům).

Nutnost provedení dvou měření, ve kterých se každým senzorem vždy zaznamenávají dva časy příchodu echa, značně zvyšuje obtížnost analýzy výsledků. Požadavkem na měřicí cyklus je provedení dvou měření s opačnými konfiguracemi senzorů. Při tom prvním zůstává konfigurace stejná, jako tomu bylo doposud. Senzor 1 je nastaven do režimu vysílače a senzor 2 do režimu přijímače. Po provedení měření jsou výsledné časy TOF1 a TOF2 zaznamenané oběma senzory uloženy. Měření je posléze opakováno s opačnou konfigurací: senzor 1 je v režimu přijímače a senzor 2 je vysílačem. Časy TOF1 a TOF2 zaznamenané jednotlivými senzory jsou opět uloženy. Výsledná tabulka s uloženými časy může mít strukturu například jako tab. 2.1. Indexy u zachycených časů v této tabulce opět pomáhají lepší orientaci v následujících krocích. Písmeno *D* v indexu značí, že při daném měření byl tento senzor vysílačem (Direct measurement), kdežto písmeno *I* označuje senzor v nepřímém režimu měření (Indirect measurement). Číslo za tímto písmenem označuje, ve kterém měření byl tento čas zachycen. Ve vytvořených algoritmech lze snadno určit, jaký senzor byl v daném měření vysílačem. V měření 1 je vždy vysílačem senzor 1, v měření 2 je vysílačem senzor 2 a tak dále.

Tab. 2.1: Naměřené časy uložené v paměti po ukončení obou měření

		TOF1 [μs]	TOF2 [μs]
Měření 1	Senzor 1 (vysílač)	$TOF1_{D,1}$	$TOF2_{D,1}$
	Senzor 2	$TOF1_{I,1}$	$TOF2_{I,1}$
Měření 2	Senzor 1	$TOF1_{I,2}$	$TOF2_{I,2}$
	Senzor 2 (vysílač)	$TOF1_{D,2}$	$TOF2_{D,2}$

Po skončení měření a vyčtení výsledných časů následuje jejich převod na vzdálenosti. K převodu časů zachycených senzory v režimu vysílače na vzdálenost  $D$  je využit jednodušší vzorec:

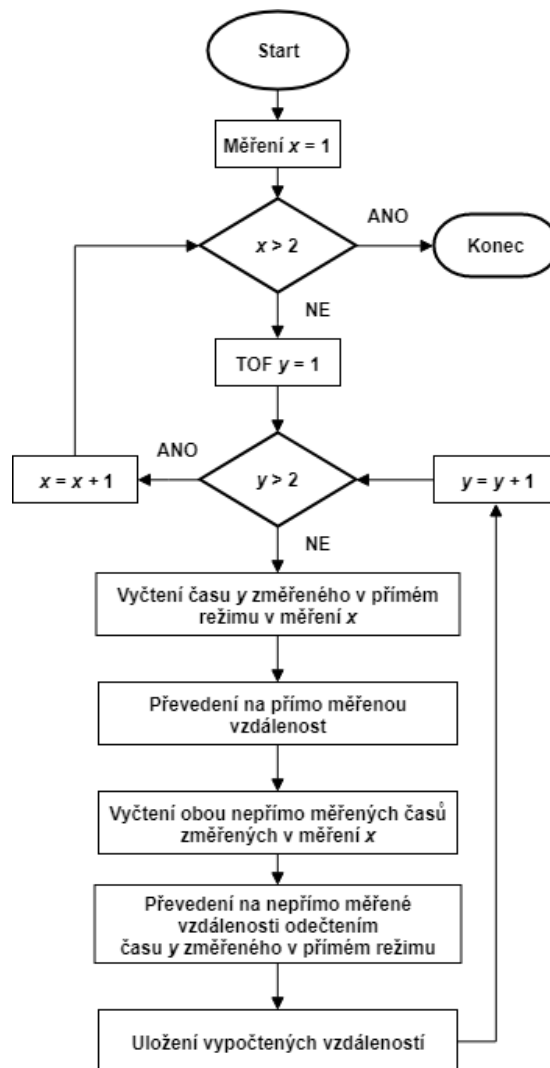
$$D_{x,y} = \frac{TOF_{x_{D,y}}}{2} \times v \quad [\text{m}], \quad (2.10)$$

kde  $x$  značí pořadí příchozího signálu do senzoru v režimu vysílače (TOF1 nebo TOF2) a index  $y$  značí pořadové číslo měření. Tyto vzdálenosti jsou obvykle korektně určeny.

Již na obr. 2.6 bylo naznačeno, že existuje několik kombinací přiřazení časů měřených v přímém a nepřímém režimu, ale pouze některé jsou v dané situaci korektní. Vytvořený algoritmus provede všechny možné kombinace vzájemného přiřazení časů včetně těch nekorektních. Každý čas změřený v nepřímém režimu měření je tedy použit ve dvou výpočtech nepřímo měřené vzdálenosti. V jednom výpočtu je od něj při převodu odečten první čas zaznamenaný senzorem v režimu vysílače a ve druhém je odečten druhý čas zaznamenaný vysílačem. Vztah, podle kterého dochází k přepočtu na vzdálenost  $I$  změřenou v režimu nepřímého měření, má tvar:

$$I_{z-D_{x,y}} = \left( TOF_{z_{I,y}} - \frac{TOF_{x_{D,y}}}{2} \right) \times v \quad [\text{m}], \quad (2.11)$$

kde  $z$  značí pořadí příchozího echa do senzoru v režimu přijímače (TOF1 nebo TOF2) a  $D_{x,y}$  informuje o tom, jaký čas změřený v přímém režimu ( $TOF_{x_{D,y}}$ ) byl zvolen pro odečtení od času změřeného v nepřímém režimu ( $TOF_{z_{I,y}}$ ). Zjednodušený průběh algoritmu převádějícího změřené časy na vzdálenosti je zobrazen v diagramu na obr. 2.7.



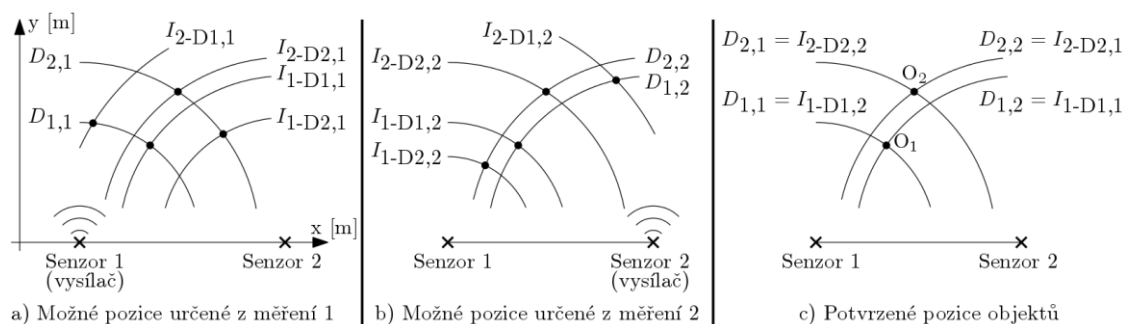
Obr. 2.7: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu převádějícího změřené časy na vzdálenosti

Ve výsledné tabulce vzdáleností je několik správně i nesprávně vypočtených vzdáleností změřených v nepřímém režimu. V ideálním případě jde o dvě korektně a dvě nekorektně určené vzdálenosti. Možná podoba výsledné tabulky vypočtených vzdáleností je zobrazena v tab. 2.2. V této výsledné tabulce je důležité rozpoznat, které kombinace byly vypočteny správně a pouze z nich provést trilateraci.

Tab. 2.2: Tabulka převedených vzdáleností v případě dvou měření

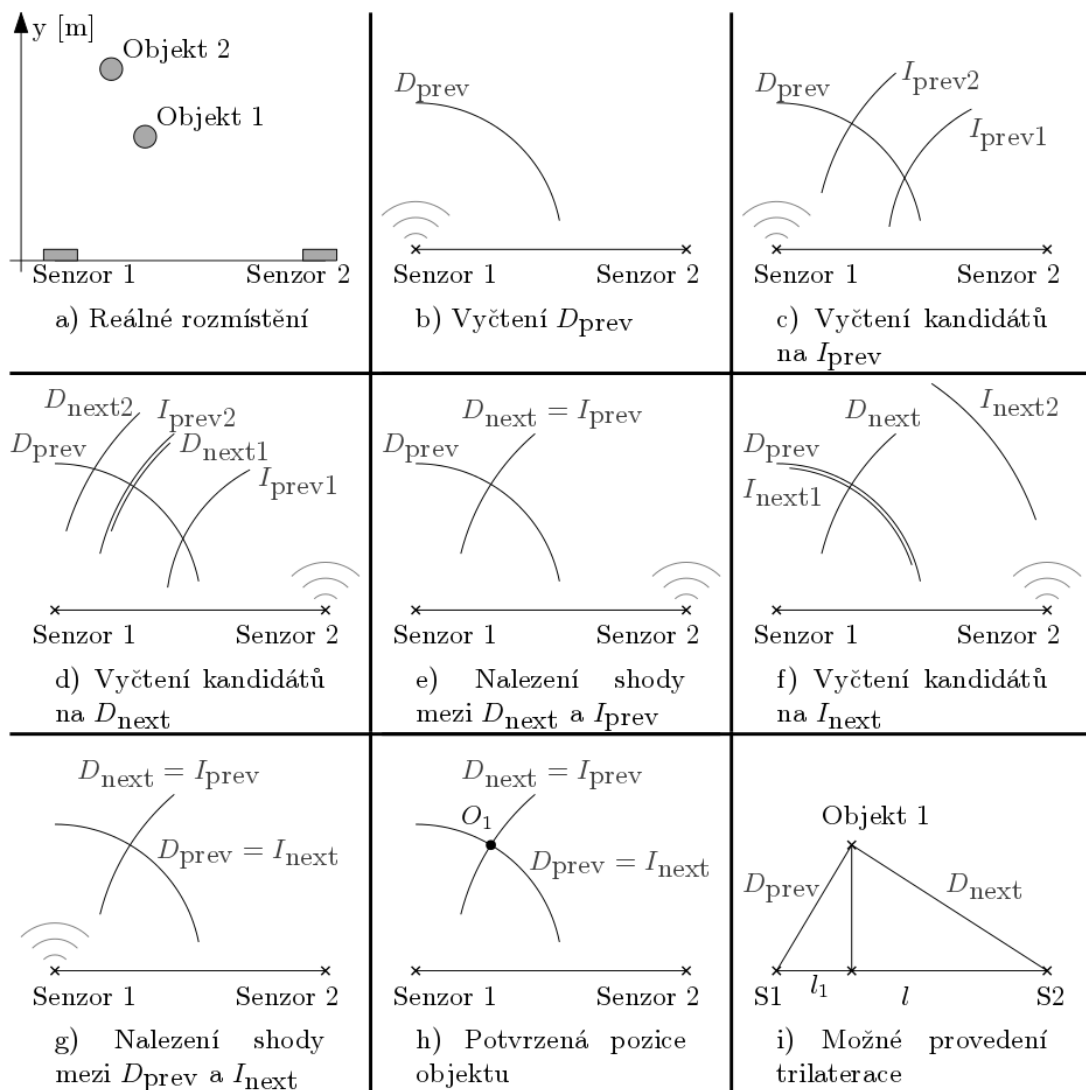
		Vypočtené vzdálenosti [m]			
Měření 1	Senzor 1 (vysílač)	$D_{1,1}$		$D_{2,1}$	
	Senzor 2	$I_{1-D1,1}$	$I_{2-D1,1}$	$I_{1-D2,1}$	$I_{2-D2,1}$
Měření 2	Senzor 1	$I_{1-D1,2}$	$I_{2-D1,2}$	$I_{1-D2,2}$	$I_{2-D2,2}$
	Senzor 2 (vysílač)	$D_{1,2}$		$D_{2,2}$	

K tomuto rozpoznávání byl vytvořen algoritmus založený na již dříve popisované myšlence. Vyhledávají se takové kombinace přímo a nepřímě měřených vzdáleností, aby byla každá vzdálenost použita k trilateraci jednoho objektu změřena v průběhu tohoto měřicího cyklu dvakrát. Základním principem potvrzování pozice objektu je předpoklad, že pokud je nějaká nepřímě měřená vzdálenost od senzoru X správně vypočtená, bude v dalším měření, kde je senzor X v režimu vysílače (v režimu přímého měření), jedna z nově změřených vzdáleností rovna právě předchozí nepřímě měřené vzdálenosti. Zároveň bude přímo měřená vzdálenost senzorem Y použita k výpočtu takto potvrzené vzdálenosti od senzoru X rovna nepřímě měřené vzdálenosti od senzoru Y změřené v dalším měření, ve kterém je senzor X vysílačem. Na obr. 2.8 je zobrazeno, proč je vlastně tento algoritmus tak důležitý. Z obrázku je patrné, že pouze jedním měřením není možné rozlišit, ve které ze čtyř možných poloh (průsečících kružnic se středy v jednotlivých senzorech a poloměry určenými přímo nebo nepřímě měřenými vzdálenostmi změřenými těmito senzory) se nachází opravdové překážky. Až kombinací těchto dvou měření lze získat údaje o pozicích objektů.



Obr. 2.8: Princip algoritmu potvrzujícího pozice objektů

Proces potvrzování pozice překážky znázorněný na obr. 2.9 a v diagramu na obr. 2.10 začíná výběrem jedné ze dvou vzdáleností změřených v přímém režimu senzorem 1 v měření 1. Tato vzdálenost bude pro názornost označena  $D_{prev}$ . Dalším krokem je vyčtení vzdáleností změřených v nepřímém režimu senzorem 2 v měření 1, které byly vypočteny odečtením zvolené vzdálenosti  $D_{prev}$ . Tyto dvě vzdálenosti změřené v nepřímém režimu v měření 1 jsou porovnávány se vzdálenostmi změřenými také senzorem 2 ale v přímém režimu v měření 2. Pokud je nalezena shoda, je vzdálenost změřená v nepřímém režimu označena  $I_{prev}$  a přímo měřená vzdálenost  $D_{next}$ . První ze vzdáleností k objektu je potenciálně potvrzená ( $I_{prev} = D_{next}$ ). Nyní se vyčtou další dvě nepřímě měřené vzdálenosti, tentokrát to jsou ale vzdálenosti měřené senzorem 1 v měření 2, u kterých byla při výpočtu odečtena potenciálně potvrzená vzdálenost  $D_{next}$ . Tyto dvě vzdálenosti se porovnávají s na začátku zvolenou vzdáleností změřenou v přímém režimu senzorem 1 v měření 1  $D_{prev}$ . Pokud je nalezena shoda, dostane vzdálenost změřená v nepřímém režimu označení  $I_{next}$ . Nyní je potvrzená i druhá vzdálenost ( $D_{prev} = I_{next}$ ) a také je potvrzeno, že obě vzdálenosti k senzorům náleží tomu stejnému objektu. Po ověření všech možných kombinací přímo a nepřímě měřených vzdáleností tímto algoritmem následuje trilaterace překážky, jež probíhá na základě potvrzených vzdáleností změřených v přímém režimu měření. Experimentálně totiž bylo zjištěno, že tyto vzdálenosti obvykle bývají určeny o něco přesněji. Detekovaný objekt leží v průsečíku dvou kružnic, které mají poloměry  $D_{prev}$  a  $D_{next}$  a středy v souřadnicích senzorů 1 respektive 2.

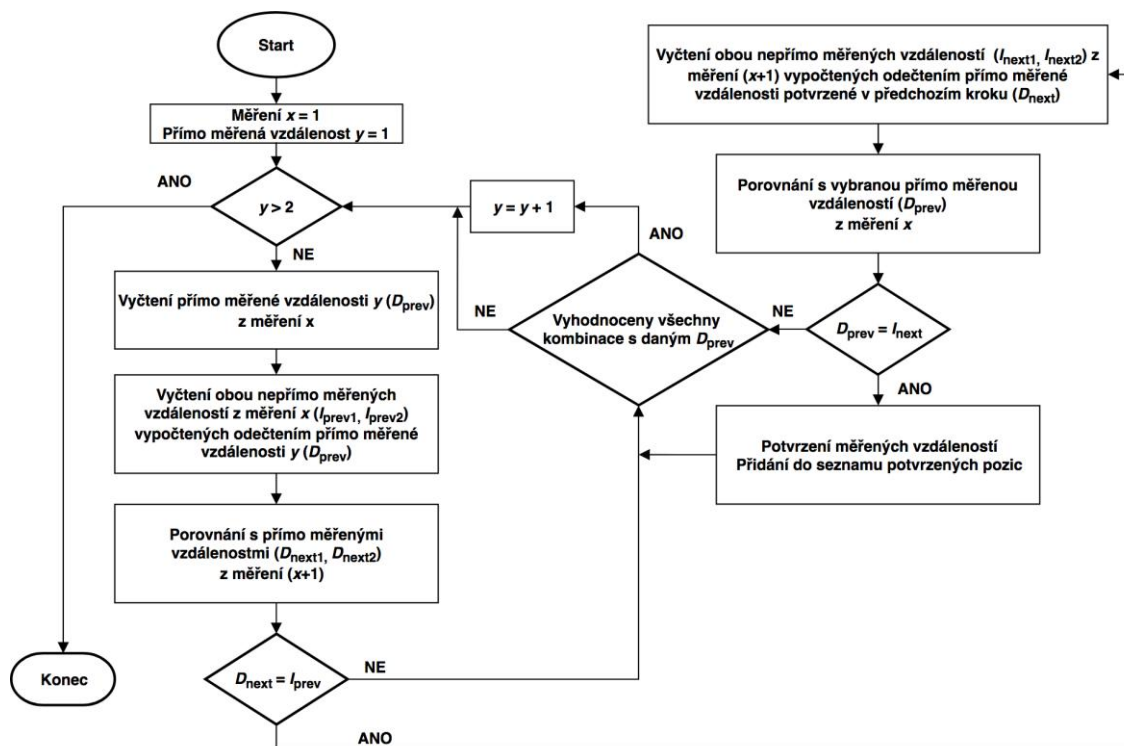


$D_{\text{prev}}$  = vybraný přímo měřený čas z 1. měření;  $D_{\text{next}}$  = přímo měřený čas z 2. měření  
 $I_{\text{prev}}$  = nepřímý měřený čas z 1. měření;  $I_{\text{next}}$  = nepřímý měřený čas z 2. měření

Obr. 2.9: Postup algoritmu při potvrzování správnosti změřených vzdáleností k objektu

Jestliže se nějaká přímo měřená vzdálenost  $D$  neshoduje se žádnou z nepřímých měřených vzdáleností  $I$ , zůstane jí označení nepotvrzené vzdálenosti, ale i tak je užitečná. Nezávislost přímo měřených vzdáleností na údajích změřených ostatními senzory znamená, že v dané vzdálenosti byla skutečně umístěna překážka, ale není jistá její přesná pozice v prostoru, protože ji ostatní senzory nezaznamenaly. Taková překážka nemůže být graficky znázorněna jedním bodem, jelikož je známa pouze vzdálenost od daného senzoru, jenž má velmi širokou vyzařovací charakteristiku. Lze ji tedy zobrazit například jako část kružnice, která je omezena vyzařovacím úhlem senzoru, jelikož není možné zaznamenat kupříkladu překážku ležící za senzorem. Pokud není ani jedna z přímo měřených vzdáleností potvrzena, budou výsledkem 4 části kružnice s poloměry odpovídajícími jednotlivým zachyceným vzdálenostem  $D$  změřeným v přímém režimu. Nepotvrzené vzdálenosti určené v nepřímém režimu měření jsou pravděpodobně špatně vypočtené a jejich zobrazování v grafické podobě nemá význam.





Obr. 2.10: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost dvou změřených vzdáleností

## 2.3 Lokalizace dvou překážek s využitím tří ultrazvukových senzorů

Tři ultrazvukové parkovací senzory se již v náraznících vozidel vyskytují častěji, jelikož dovedou dostatečně pokrýt plochu před nárazníkem vozidla. Nejen že je možné využít větší množství senzorů pro pokrytí větší plochy, ale lze je také využít při rozšíření algoritmu potvrzujícího pozice překážek. Potvrzení pozice objektu měřením ze všech tří senzorů zvyšuje jistotu, že jde o skutečnou překážku.

V předchozím případě se role dvou měničů mezi měřeními prohazovaly, aby mohlo proběhnout potvrzovací měření. V případě použití tří senzorů postupuje měření během měřicího cyklu způsobem znázorněným v tab. 2.3. Vždy je pouze jeden měnič v konfiguraci vysílače a ostatní jsou nastaveny jako přijímače.

Tab. 2.3: Průběh měřicího cyklu v případě použití tří parkovacích senzorů

	Měření 1	Měření 2	Měření 3
Senzor 1	Přímé měření vzdálenosti (vysílač/přijímač)	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)
Senzor 2	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)	Přímé měření vzdálenosti (vysílač/přijímač)	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)
Senzor 3	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)	Nepřímé měření vzdálenosti (přijímač)	Přímé měření vzdálenosti (vysílač/přijímač)

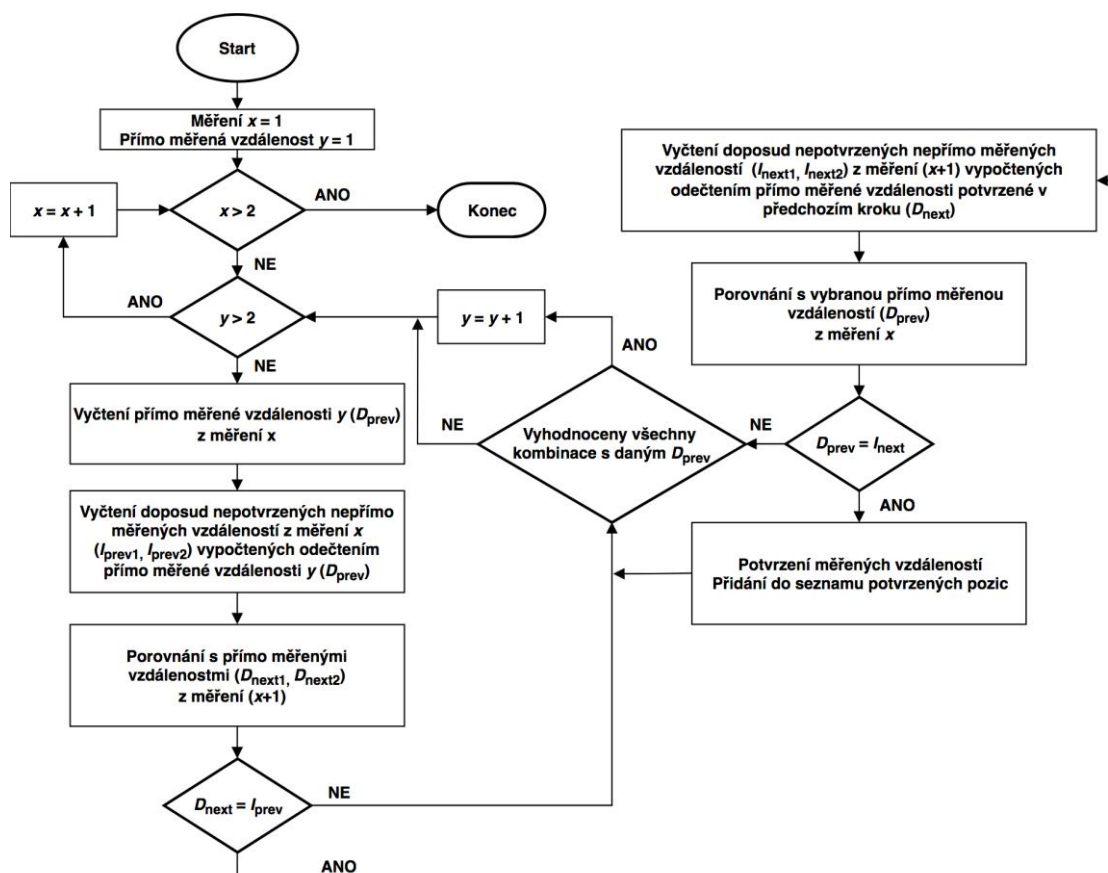
Tabulka převedených vzdáleností se rozšiřuje o třetí měření a o časy změřené senzorem 3 v každém z nich. Její možná podoba je znázorněna v tab. 2.4.

Tab. 2.4: Tabulka převedených vzdáleností v případě provedení tří měření třemi senzory

		Vypočtené vzdálenosti [m]			
Měření 1	Senzor 1 (vysílač)	$D_{1,1}$		$D_{2,1}$	
	Senzor 2	$I_{1-D1,1}$	$I_{2-D1,1}$	$I_{1-D2,1}$	$I_{2-D2,1}$
	Senzor 3	$I_{1-D1,1}$	$I_{2-D1,1}$	$I_{1-D2,1}$	$I_{2-D2,1}$
Měření 2	Senzor 1	$I_{1-D1,2}$	$I_{2-D1,2}$	$I_{1-D2,2}$	$I_{2-D2,2}$
	Senzor 2 (vysílač)	$D_{1,2}$		$D_{2,2}$	
	Senzor 3	$I_{1-D1,2}$	$I_{2-D1,2}$	$I_{1-D2,2}$	$I_{2-D2,2}$
Měření 3	Senzor 1	$I_{1-D1,3}$	$I_{2-D1,3}$	$I_{1-D2,3}$	$I_{2-D2,3}$
	Senzor 2	$I_{1-D1,3}$	$I_{2-D1,3}$	$I_{1-D2,3}$	$I_{2-D2,3}$
	Senzor 3 (vysílač)	$D_{1,3}$		$D_{2,3}$	

### 2.3.1 Algoritmus využívající dvě měření k potvrzení pozice

Algoritmus určování polohy objektů přímo vychází z postupu popisovaného v kapitole 2.2. Porovnávání mezi přímo a nepřímo změřenými vzdálenostmi probíhá pouze mezi sousedními senzory čili mezi senzorem 1 a 2 a senzorem 2 a 3. Nepředpokládá se, že by kombinace senzorů 1 a 3 zachytila objekt, který by předchozími kombinacemi senzorů zachycen nebyl. Pokud budou stále zaznamenány každým senzorem dva časy příchodu signálu, pak lze se třemi parkovacími senzory v ideálním případě určit přesnou polohu dvou překážek (celkem 4 změřené časy) a vzdálenost dvou překážek, jejichž přesná pozice není známa (zbývající dva nepotvrzené změřené časy). V nejhorším případě může být zobrazena pouze vzdálenost až k šesti překážkám, jejichž přesná pozice ale nebyla zjištěna. Vývojový diagram tohoto algoritmu je zobrazen na obr. 2.11.



Obr. 2.11: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost měření na základě dvou po sobě jdoucích měření

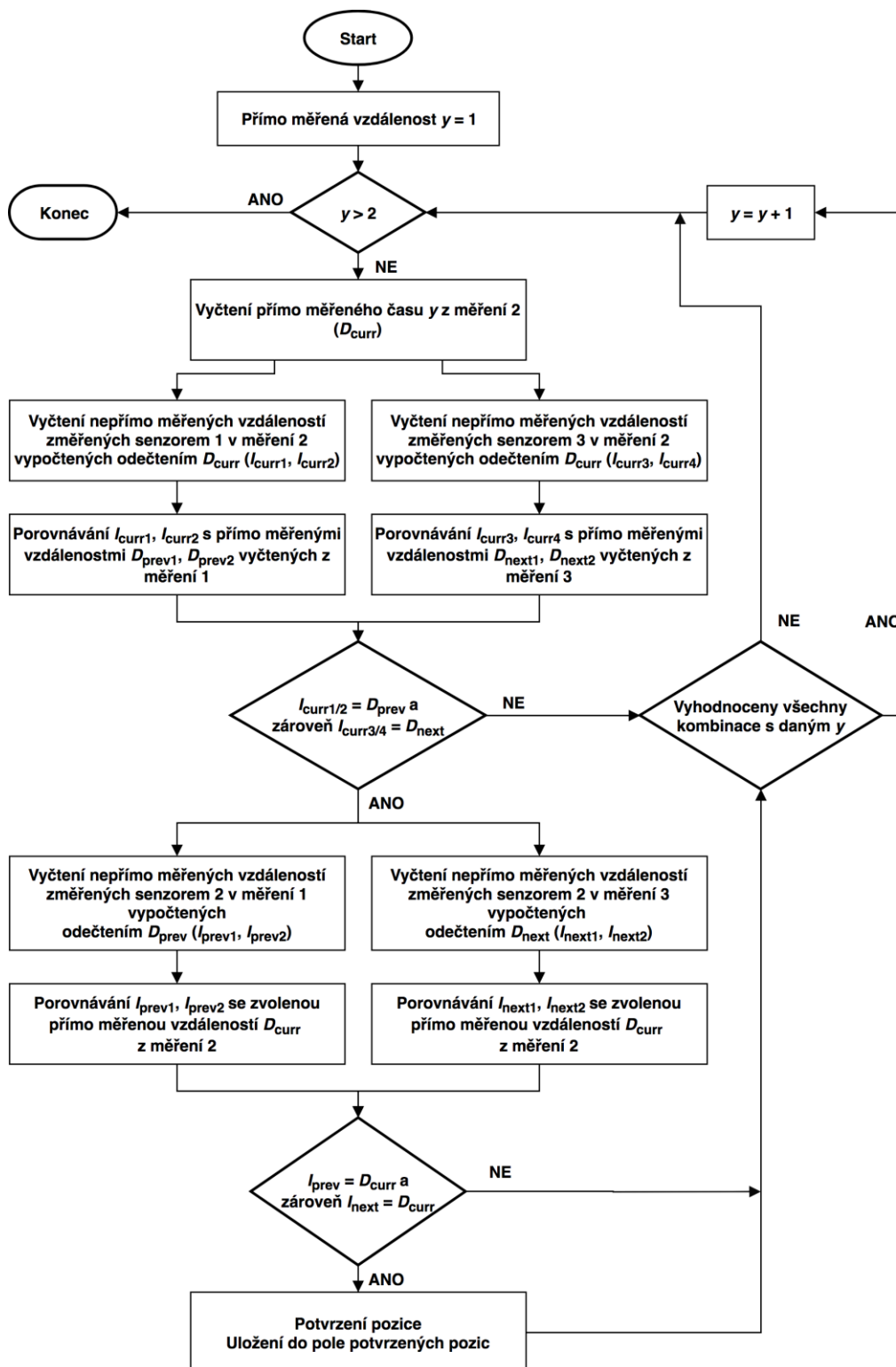
Pokud je algoritmem potvrzený objekt skutečný a dostatečně vzdálený od senzorů, tak je velmi pravděpodobné, že bude stejná překážka zachycena nejen dvojicí senzorů 1 a 2, ale i dvojicí 2 a 3. Ve velmi krátkých vzdálenostech od senzorů nebo za neobvyklých podmínek může být objekt zachycen pouze jednou dvojicí senzorů, jenž určí jeho pozici.

### 2.3.2 Algoritmus využívající tři měření k potvrzení pozice

Zachycení vzdálenosti k objektu dvěma ultrazvukovými senzory k provedení trilaterace stačí, ale mohou se vyskytnout situace, ve kterých se vlivem tolerančního pásma při potvrzování vzdáleností v navrženém algoritmu a vlivem nepřesností měření vypočítají souřadnice neexistujícího objektu. Využití tří ultrazvukových senzorů přináší možnost zvýšení jistoty získání správného výsledku provedením trilaterace pouze v případě, že je potvrzena vzdálenost ke stejnému objektu ze všech tří senzorů.

Přesněji řečeno jde o rozšíření předchozího algoritmu založeného potvrzování pomocí dvou měření. V předchozím případě algoritmus porovnával změřené hodnoty mezi senzory 1 a 2 a mezi senzory 2 a 3. Nový algoritmus spojuje tyto dvě srovnávání do jednoho celku. Potvrzená pozice objektu je nyní určena třemi vzdálenostmi od tří senzorů, ale k ověření správnosti vzdálenosti objektu od senzorů 1 a 3 i nadále dostačuje pouze jejich dvojnásobné potvrzení (tj. naměření stejné vzdálenosti ve dvou po sobě jdoucích měřeních). V případě vzdálenosti od senzoru 1 postačuje, pokud se stejná vzdálenost k objektu změří v měřeních 1 a 2 a v případě senzoru 3 stačí změřit stejnou vzdálenost v měřeních 2 a 3. Vzdálenost od senzoru 2 je ale potvrzena hned trojnásobně: ve všech třech měřeních musí být změřena tatáž vzdálenost k objektu, aby mohla být považována za potvrzenou. Samozřejmě by bylo možné aplikovat stejně rigorózní přístup i na vzdálenosti naměřené senzory 1 a 3, ale při praktických zkouškách bylo zjištěno, že kvůli jejich velké vzdálenosti od sebe pouze málokdy zachytí senzor 3 dostatečně silné echo odražené od překážky po vysílání senzorem 1. To stejné platí i naopak. Senzor 2 však zachytí odražené echo ve většině situací, proto je u něj přísnější posuzování možné. Tento přístup ale způsobí nedokonalou provázanost mezi všemi třemi měřeními a může opět nastat situace, ve které bude určena falešná pozice překážky. Tyto situace je naštěstí možné vyloučit při následné kontrole.

Upravený algoritmus z kapitoly 2.2 byl dle výše uvedených požadavků upraven do podoby znázorněné v diagramu na obr. 2.12 a rovněž na obr. 2.14. Prvním rozdílem je to, že algoritmus začíná uprostřed v měření číslo 2, ve kterém je senzor 2 v režimu vysílače. Vybere se jedna z přímo měřených vzdáleností měřených tímto senzorem a zapamatuje se. Dále bude označována jako  $D_{curr}$ . Dalším krokem je vyčtení nepřímo měřených vzdáleností ze stejného měření, které byly vypočteny odečtením zvolené vzdálenosti  $D_{curr}$ . Nepřímo měřené vzdálenosti změřené senzorem 1 ( $I_{curr1}$ ,  $I_{curr2}$ ) se porovnávají s těmi přímo měřenými senzorem 1 v měření 1 ( $D_{prev1}$ ,  $D_{prev2}$ ) a nepřímo měřené vzdálenosti měřené senzorem 3 ( $I_{curr3}$ ,  $I_{curr4}$ ) se porovnávají s těmi přímo měřenými senzorem 3 v měření 3 ( $D_{next1}$ ,  $D_{next2}$ ). Pokud jsou mezi těmito vzdálenostmi nalezeny shody ( $D_{prev} = I_{curr1/2}$  a zároveň  $D_{next} = I_{curr2/3}$ ), pokračuje algoritmus vyčtením nepřímo měřených vzdáleností změřených senzorem 2 v měření 1, při jejichž výpočtu byla odečtena vzdálenost  $D_{prev}$  ( $I_{prev1}$ ,  $I_{prev2}$ ), a také vyčtením nepřímo měřených vzdáleností změřených senzorem 2 v měření 3, které byly vypočítány odečtením vzdálenosti  $D_{next}$  ( $I_{next1}$ ,  $I_{next2}$ ). Tyto vzdálenosti jsou srovnávány s na začátku zvolenou přímo měřenou vzdáleností  $D_{curr}$ . Pokud jsou i v tomto kroku nalezeny shody ( $D_{curr} = I_{prev} = I_{next}$ ), je potvrzování pozice daného objektu hotové. Do pole výsledků jsou zaznamenány potvrzené přímo měřené vzdálenosti od jednotlivých senzorů ( $D_{prev}$ ,  $D_{curr}$  a  $D_{next}$ ), pomocí kterých bude následně provedena trilaterace.



Obr. 2.12: Zjednodušený vývojový diagram algoritmu potvrzujícího správnost měření na základě tří měření

K ilustraci průběhu určování průsečíku kružnic slouží obr. 2.13. Nejprve se vyhodnocuje, zda se dvě kružnice se středy v bodech  $S_1$  (senzor 1) a  $S_2$  (senzor 2) a poloměry  $r_1$  ( $D_{\text{prev}}$ ) a  $r_2$  ( $D_{\text{curr}}$ ) protínají. Situace, ve kterých by se kružnice neprotínaly, lze detekovat pomocí dvou podmínek. Jestliže je vzdálenost mezi středy kružnic větší, než je součet poloměrů kružnic sestavených z těchto středů, pak mezi nimi neexistuje průsečík. Stejně tak průsečík neexistuje v případě, že je rozdíl poloměrů těchto kružnic menší, než je vzdálenost mezi jejich středy. Tyto podmínky popisují nerovnice:

$$l < |r_1 - r_2|. \quad (2.13)$$

$$l_1 = \frac{r_1^2 + r_2^2 + l^2}{2l} \quad [\text{m}]. \quad (2.14)$$

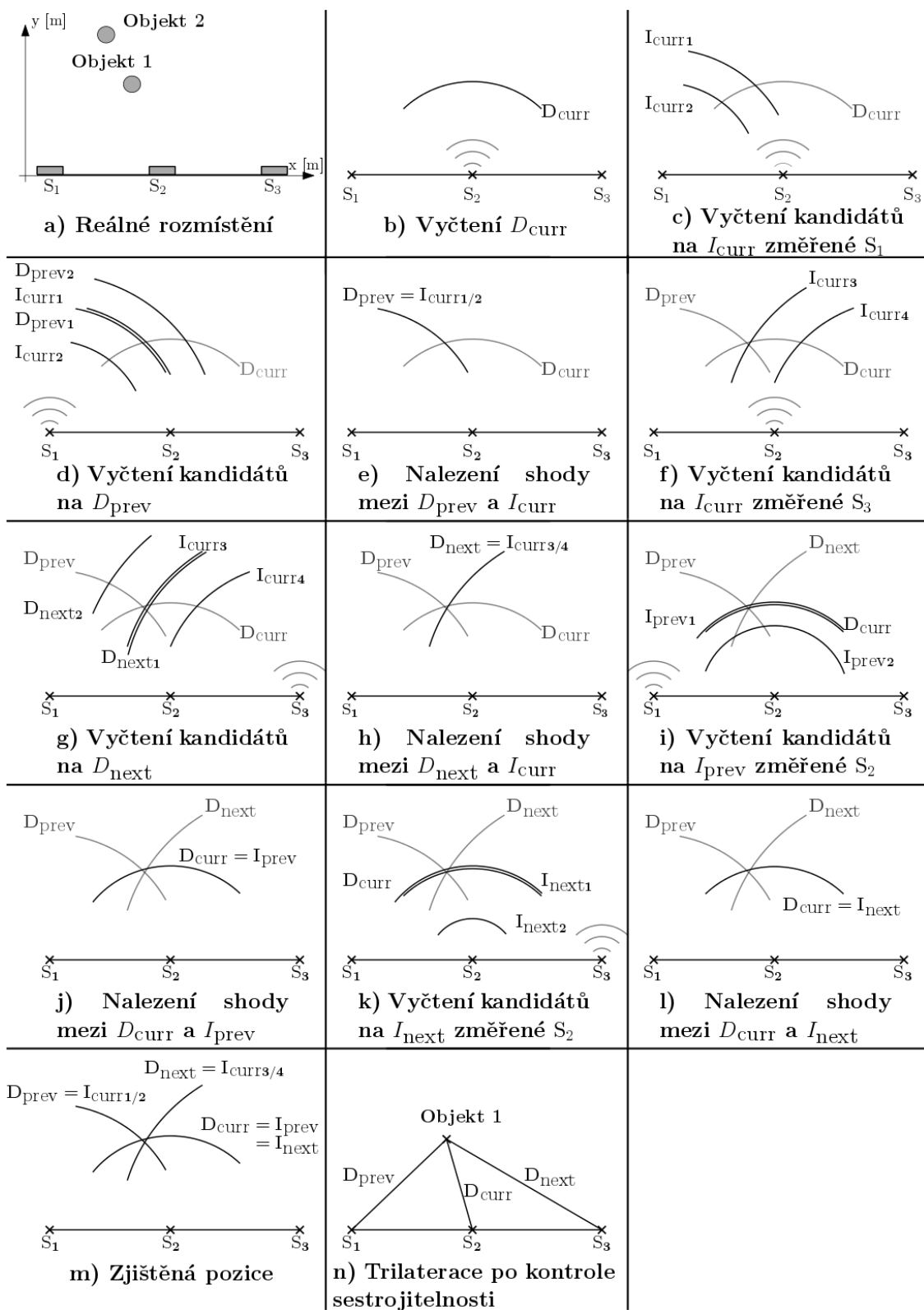
Se znalostí vzdálenosti  $l_1$  je již možné výšku trojúhelníka vypočítat s využitím Pythagorovy věty:

$$h = \pm \sqrt{r_1^2 - l_1^2} \quad [\text{m}]. \quad (2.15)$$

Souřadnice vypočtených průsečíků mají souřadnice  $O[l_1, h]$  a  $O'[l_1, -h]$ . Bod  $O'$  je možné vyloučit, protože detekovaný objekt nemůže ležet v oblasti za senzory. V dalším kroku je zjišťováno, zda bodem  $O$  prochází také kružnice se středem  $S_3$  (senzor 3). Z Pythagorovy věty se vypočte vzdálenost  $d$  mezi bodem  $O$  a senzorem 3:

$$d = \sqrt{h^2 - (2l - l_1)^2} \quad [\text{m}]. \quad (2.16)$$

Jestliže je tato vzdálenost  $d$  srovnatelná s poloměrem  $r_3$  ( $D_{\text{next}}$ ) kružnice se středem bodě  $S_3$ , pak tato kružnice také prochází bodem  $O$  a souřadnice tohoto bodu jsou i souřadnicemi detekované překážky. Pokud kružnice bodem  $O$  neprochází, musí být tato pozice prohlášena za nepotvrzenou.



Obr. 2.14: Postup algoritmu při vyhledávání správně změřených vzdáleností k objektu s využitím údajů ze všech tří senzorů



## 3 IMPLEMENTACE ALGORITMŮ A JEJICH OVĚŘENÍ

Pro ověření teoretických poznatků z předchozí kapitoly byla důležitá praktická měření, jež jsou v této kapitole popsány společně s úpravami, které byly potřebné pro implementaci vytvořených algoritmů do softwaru.

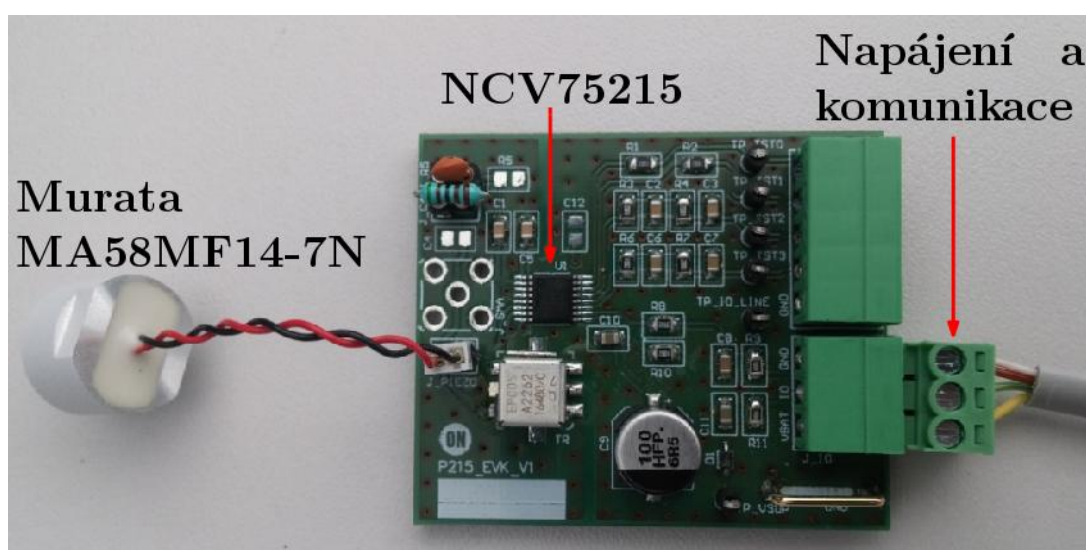
### 3.1 Využití přípravky

K praktickému měření byly využity některé již existující a používané moduly. Rovněž byla zhotovena jednoduchá imitace nárazníku vozidla, ve které bylo možné fixovat použité ultrazvukové senzory.

#### 3.1.1 Modul P215\_EVK\_V1

Integrované obvody NCV75215 jsou pro účely snadného testování a měření umístěny na samostatných modulech P215\_EVK\_V1, jejichž podobu zachycuje obr. 3.1. Na těchto modulech jsou všechny potřebné externí komponenty k uskutečnění měření a to především transformátor a důležité ladící součástky (viz kapitola 1.3). Samozřejmostí je i konektor pro vybraný druh piezoelektrického měniče. Při všech měřeních byl použit měnič Murata MA58MF14-7N určený pro aplikace v parkovacích asistentech. Na desce jsou také vyvedeny testovací body, na které je možné z obvodu NCV75215 připojit vybrané vnitřní signály pro účely testování. Deska se k nadřazeným modulům připojuje pomocí tří vodičů, z nichž dva slouží k napájení a jeden ke komunikaci po sběrnici I/O Line.

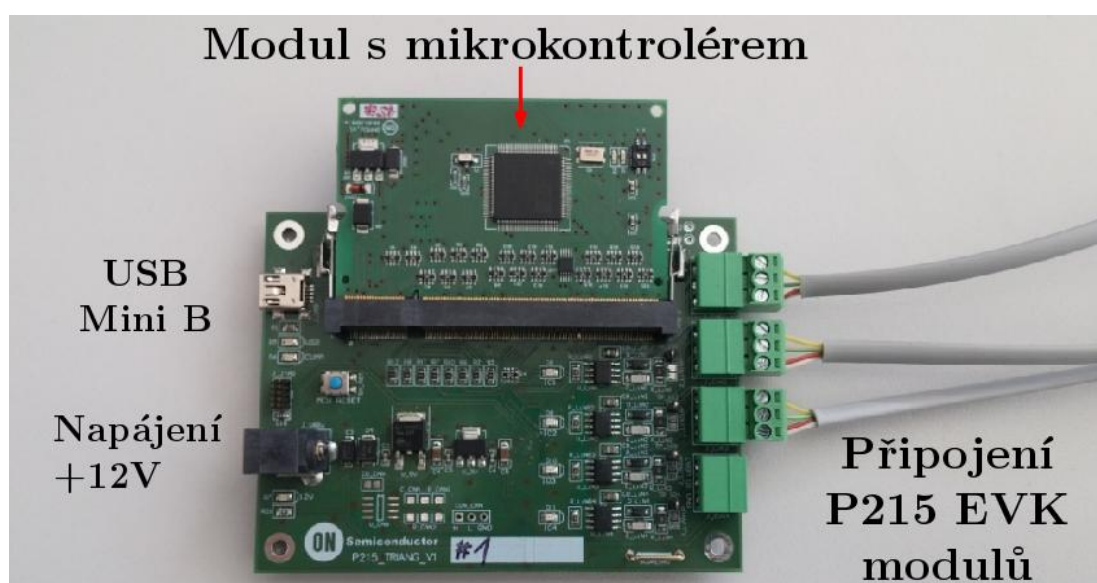
Modul je schopný přes převodník a speciální software komunikovat s počítačem přímo, ale pro ovládání více desek současně bylo toto řešení shledáno jako velice nepraktické. Proto existuje i deska P215\_TRIANG popisovaná v následující sekci.



Obr. 3.1: Modul P215\_EVK s obvodem NCV75215 a připojený piezoelektrický měnič

### 3.1.2 Modul P215\_TRIANG\_V1

K řízení všech tří modulů s obvodem NCV75215 současně byla využita deska P215\_TRIANG\_V1 vyvinutá speciálně pro účely triangulace (trilaterace). Tento modul umožňuje připojení a komunikaci s maximálně čtyřmi P215\_EVK\_V1 moduly. Do této desky se také připojuje samostatný modul s výkonným mikrokontrolérem Atmel (Microchip) AT32UC3C1512C, který obsahuje firmware řídící komunikaci s jednotlivými připojenými moduly ale i s počítačem. Převod mezi vysokými napětími používanými při komunikaci přes sběrnici I/O Line a napětíovými úrovněmi mikrokontroléru obstarávají integrované obvody NCV7321 od společnosti ON Semiconductor. Podobu desky zachycuje obr. 3.2.



Obr. 3.2: Hlavní modul P215\_TRIANG

### 3.1.3 Imitace nárazníku vozidla

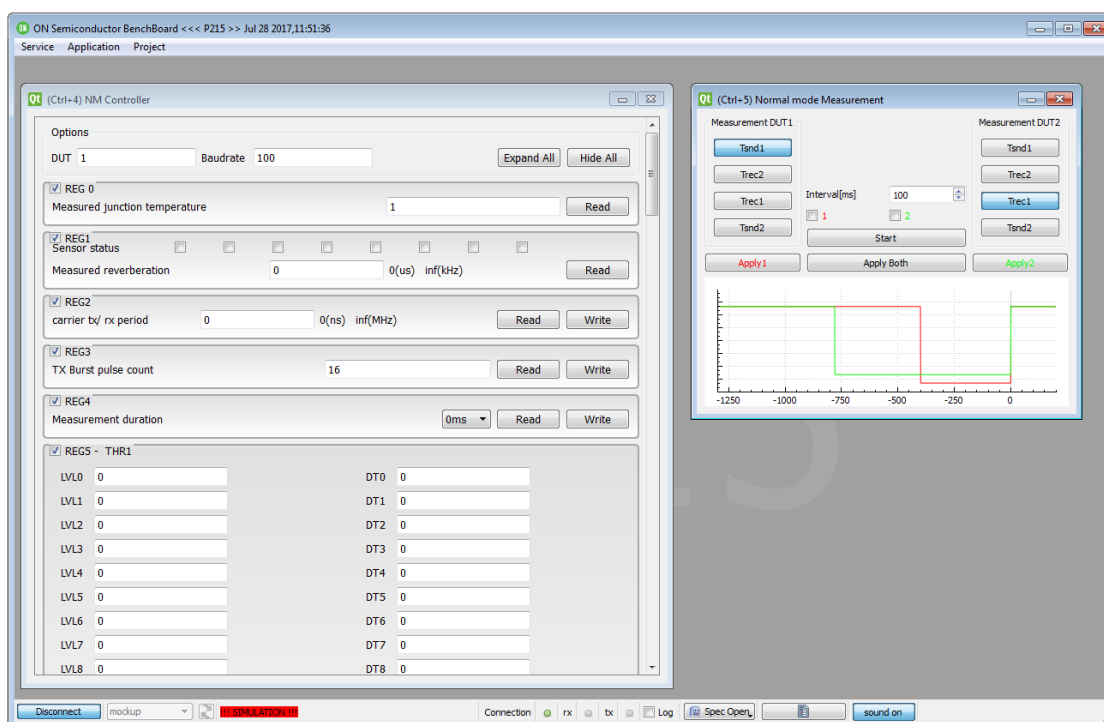
K získání opakovatelných výsledků a také pro přiblížení se reálné aplikaci použitých ultrazvukových senzorů a obvodů NCV75215 byla vytvořena napodobenina nárazníku vozidla. Tato imitace obsahuje čtyři otvory, do kterých mohou být vloženy piezoelektrické měniče Murata MA58MF14-7N. Při vkládání senzorů je důležité dodržet jejich správnou orientaci kvůli asymetrické vyzařovací charakteristice měničů. Otvor pro čtvrtý měnič nebude v této práci využit, jelikož již se třemi měniči bylo dosaženo všech požadavků. Čtvrtý měnič by pouze zvětšoval oblast, ve které je možné detekovat překážku.

Otvory pro vkládání měničů jsou tvořeny měkkým pěnovým polyetylénem, aby bylo zamezeno přenosu vibrací z rozkmitaného měniče do samotného nárazníku a přes něj do ostatních senzorů v režimu přijímače, což by vyvolalo falešně zaznamenaná echa. Všechny čtyři otvory leží v jedné rovině. Na otvorech je vyznačena správná orientace měničů a také jejich číselné označení. Signály z měničů jsou vedeny koaxiálními kabelem k samotným modulům P215\_EVK\_V1. Koaxiální kabely omezují vliv elektromagnetického rušení na přenášený signál. Kvůli snaze přiblížit se automobilovému nárazníku byla i vzdálenost mezi jednotlivými otvory zvolena

na 40 cm. Celý nárazník má délku téměř 130 cm, proto byl zkonstruován tak, že jej lze rozložit na tři menší části. Nákras nárazníku je uveden v příloze B a jeho podobu rovněž zachycuje obrázek obr. 3.9.

## 3.2 Popis původního softwaru a firmwaru

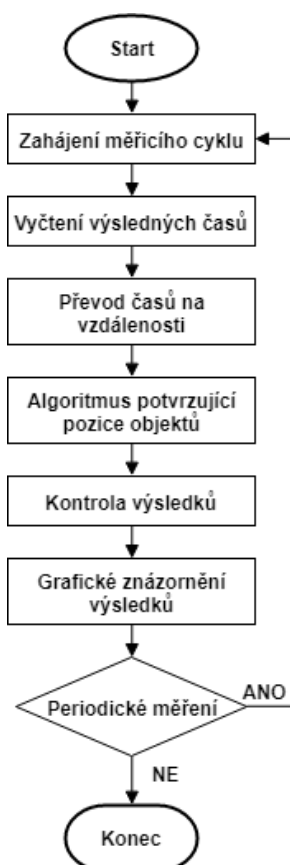
K ovládání integrovaných obvodů NCV75215 byl od vedoucího práce poskytnut software a firmware, jenž umožňoval komunikaci čipů s počítačem a nastavování registrů tohoto obvodu. Software též umožňoval zahájení měření jedním nebo dvěma obvody současně, ale neobsahoval žádné automatické vyhodnocování měření, takže bylo nutné manuálně z každého obvodu vyčíst změřený čas a poté jej ručně přepočítat na vzdálenost k překážce. Samotný software byl napsán v jazyce C++ ve vývojovém prostředí Qt Creator a byl založený na společném firemním aplikačním rámci, který usnadňuje vytváření obslužných programů a grafických uživatelských rozhraní pro nové projekty. Firmware použitý v mikrokontroléru byl schopný přijímat příkazy z řídicího softwaru v počítači a dle požadavků v nich uvedených komunikovat s vybraným čipem NCV75215 (vyčtení nebo zápis do paměti, zahájení měření). Napsaný byl v jazyce C ve vývojovém prostředí Atmel Studio. Podoba původního softwaru s otevřenými okny sloužícími k zápisům do paměti NCV75215 (okno *NM Controller*) a ke spouštění měření až dvěma čipy zároveň (okno *Normal mode Measurement*) je zachycena na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Podoba původního softwaru s otevřenými okny sloužícími ke konfiguraci čipů NCV75215 a ke spouštění měření až dvěma čipy současně

### 3.3 Popis upraveného softwaru a firmwaru

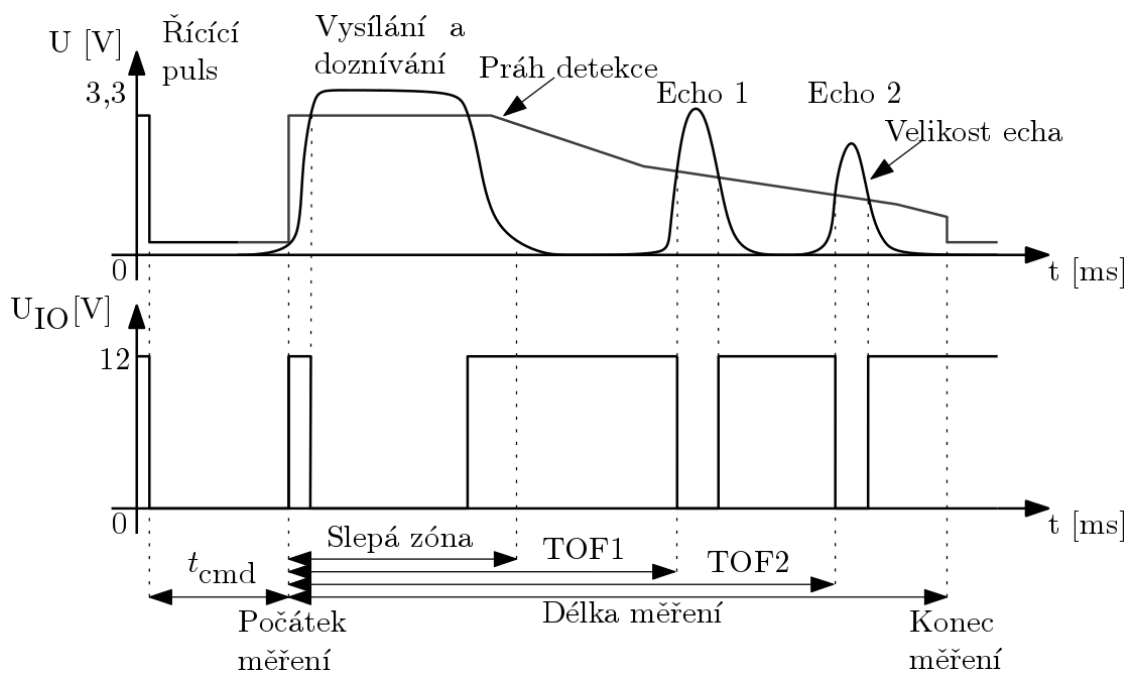
Cílem bylo upravit firmware a software do té podoby, aby bylo možné spuštění měření třemi obvody NCV75215 současně, provedení celého měřicího cyklu a následné vyhodnocení s použitím vyvinutých algoritmů. Poté by mělo dojít k provedení trilaterace a k zobrazení zjištěných pozic objektů v grafickém uživatelském rozhraní. Tento proces je zobrazen na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Diagram znázorňující požadované chování upraveného softwaru

Při první implementaci algoritmů bylo rozhodnuto, že firmware by měl zůstat nezměněn a úpravami by měl projít pouze software. Tato varianta sice byla dostačující pro rychlé ověření funkčnosti algoritmu, ale umožňovala pouze statické měření, protože celý měřicí cyklus s následným vyhodnocením trval přibližně dvě vteřiny. Způsobeno to bylo především častou komunikací mezi počítačem, mikrokontrolérem a jednotlivými obvody NCV75215. Po každém dokončeném měření musely být z paměti obvodů NCV75215 vyčteny zachycené časy, jinak by byly přepsány následujícím měřením. V případě implementace algoritmu využívajícího tři ultrazvukové senzory byl během celého měřicího cyklu z každého obvodu čas vyčten třikrát, což způsobovalo prodlevy. Pokud se překážka během měření buď jen pomalu pohybovala, nebyla obvykle přesně určena její pozice kvůli dlouhým rozestupům mezi měřeními, mezi nimiž překážka změnila pozici natolik, že se dostala mimo toleranční pásmo při posuzování shody mezi zjištěnými vzdálenostmi.

Možnost lokalizace i pomalu pohybující se překážky byla chtěnou vlastností výsledného přípravku, proto bylo rozhodnuto o zrychlení celého měřicího cyklu. K tomu bylo zapotřebí upravit část firmwaru zodpovědnou za spouštění měření. Obvody NCV75215 byly přepnuty do režimu *standard*, ve kterém pouze neukládají zaznamenané časy příchodu odraženého signálu do paměti, ale také tuto skutečnost oznámí na sběrnici I/O Line, což je zobrazeno na obr. 3.5.

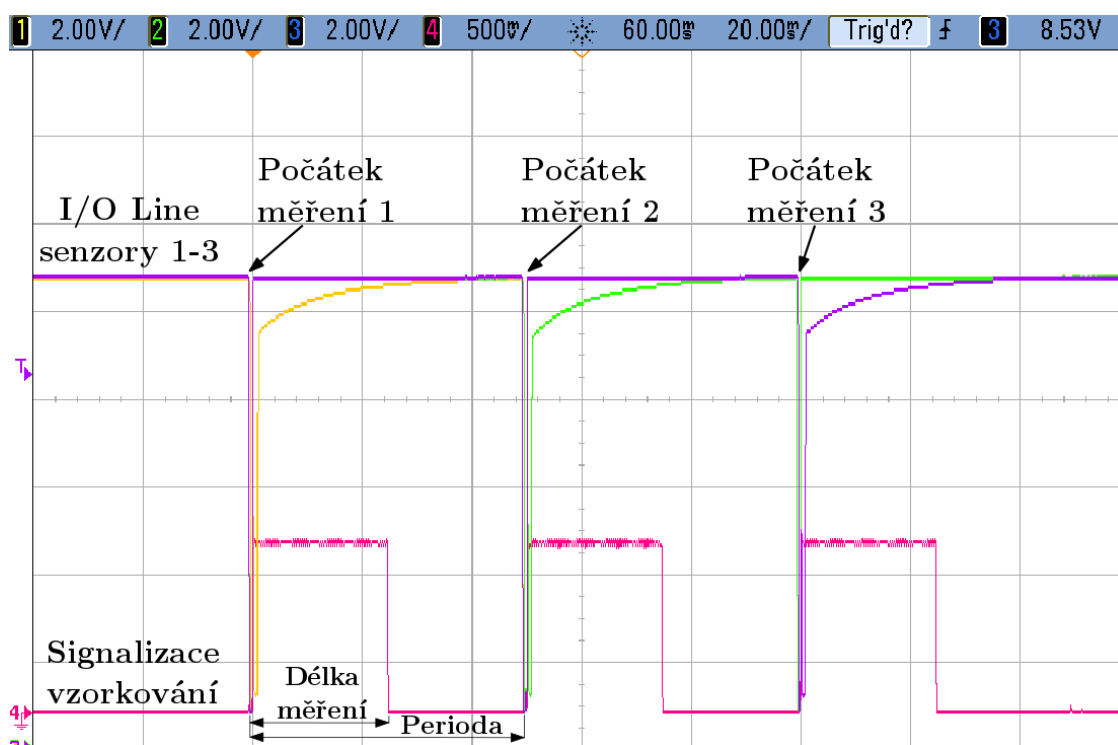


Obr. 3.5: Projev zachycení echa obvodem NCV75215 na sběrnici I/O Line v režimu 'standard'

Kód mikrokontroléru byl upraven tak, aby každých 10 mikrosekund vyvolal přerušení, v němž je vzorkována sběrnice I/O Line. Příchod echa by se na I/O Line projevil změnou logické úrovně z logické 1 na logickou 0 po dobu trvání echa, nejméně ale na 60  $\mu$ s vlivem opatření v čipu NCV75215 eliminujícího záskoky na sběrnici. Tato vzorkovací frekvence je tedy dostatečná a dokonce je vyšší než rozlišení, se kterým jsou zaznamenané časy příchodu echa v paměti obvodů NCV75215 (rozlišení 25,6  $\mu$ s) [11]. Jak již bylo popisováno v kapitole 1.3, každý obvod NCV75215 komunikuje s nadřazeným mikrokontrolérem po vlastním datovém vodiči, takže lze snadno rozpoznat, který obvod oznamuje zaznamenání příchozího echa. Mikrokontrolér detekuje sestupnou hranu porovnáváním předchozího a současného vzorku pořízeného na každé sběrnici zvlášť. Vzorkování začíná ihned po dokončení konfigurace senzorů řídicími pulsy (master command pulse), které jsou rovněž vytvářeny mikrokontrolérem na základě dat přijatých při jeho konfiguraci ze softwaru. Délka těchto pulsů určuje, zda bude daný senzor v tomto měření vysílačem anebo pouze přijímačem. Pokud je po zahájení měření zaznamenána sestupná hrana signálu na I/O Line, je do paměti mikrokontroléru uložena informace o tom, který senzor zaznamenal signál a v jaký čas od počátku měření k tomu došlo. Čas je měřen pomocí počítadla doposud uplynulých vzorkovacích přerušení. První echo zachycené senzorem v režimu vysílače je vždy ignorováno, jelikož je způsobeno samotným zahájením vysílání tímto senzorem. Ve firmwaru je nastaven limit na maximálně dva zaznamenané časy každým senzorem

během jednoho měření, stejně jako tomu je v samotných čípech NCV75215. Důvodem této volby byla možnost srovnání schopností této varianty implementace s předchozí implementací založenou pouze na úpravách softwaru v kombinaci s funkcemi čipů NCV75215. Po skončení měření je vzorkování zastaveno a čeká se na další krok měřicího cyklu. Pokud toto měření bylo v daném cyklu poslední, jsou po vyžádání zachycené časy odeslány z mikrokontroléru do softwaru v počítači, ve kterém probíhá samotné vyhledávání detekovaných objektů a trilaterace. Pokud poslední nebylo, je změněna konfigurace měničů a následuje další měření.

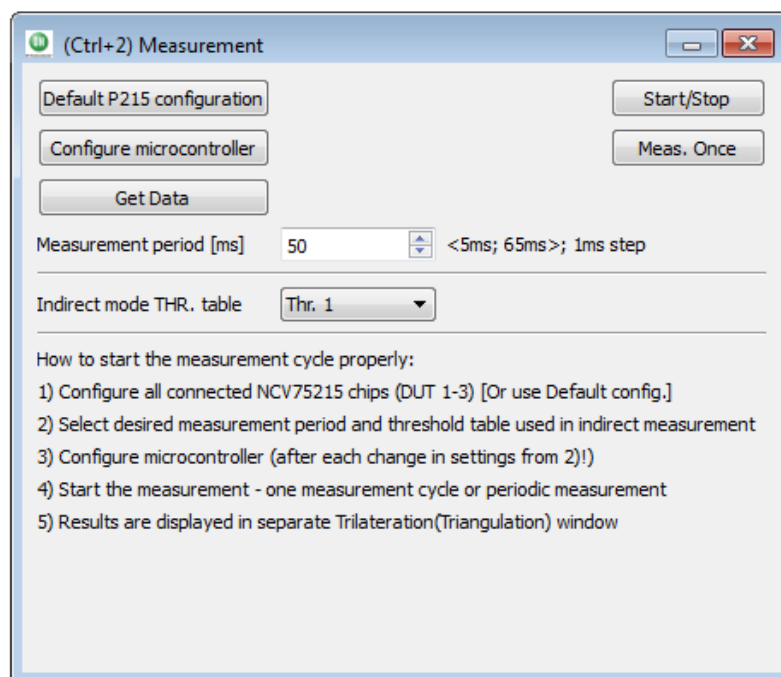
Měřicí cyklus zachycený na obr. 3.6 je složen ze tří po sobě jdoucích měření, v nichž se postupně mění role jednotlivých senzorů dle tab. 2.3. Během doby trvání každého měření jsou všechny sběrnice I/O Line po 10  $\mu$ s vzorkovány, což bylo v případě zobrazeném na obr. 3.6 indikováno rozsvícením LED diody. Perioda měření ovlivňuje dobu, po kterou se po dokončení měření čeká do zahájení dalšího měření. Je možné ji nastavit v grafickém uživatelském rozhraní, o kterém pojednává následující podkapitola.



Obr. 3.6: Komunikace na I/O Line během jednoho měřicího cyklu (bez zachycených odrazů)

### 3.3.1 Vytvořené grafické uživatelské rozhraní a jeho ovládání

Do původního softwaru byly přidány dvě nová okna zajišťující implementaci všech nových požadavků. Po připojení k desce P215 TRIANG stiskem tlačítka *Connect* k nim lze přistoupit z nabídky *Application*, která je umístěna v panelu na horním okraji hlavního okna programu. Prvním z nich je okno z názvem *Measurement* sloužící ke konfiguraci měřicího cyklu. Druhé okno *Trilateration* slouží především k zobrazování výsledků měření. Původním oknem v této nabídce je *NM Controller* soužící k nastavování jednotlivých parametrů v paměti obvodů NCV75215.

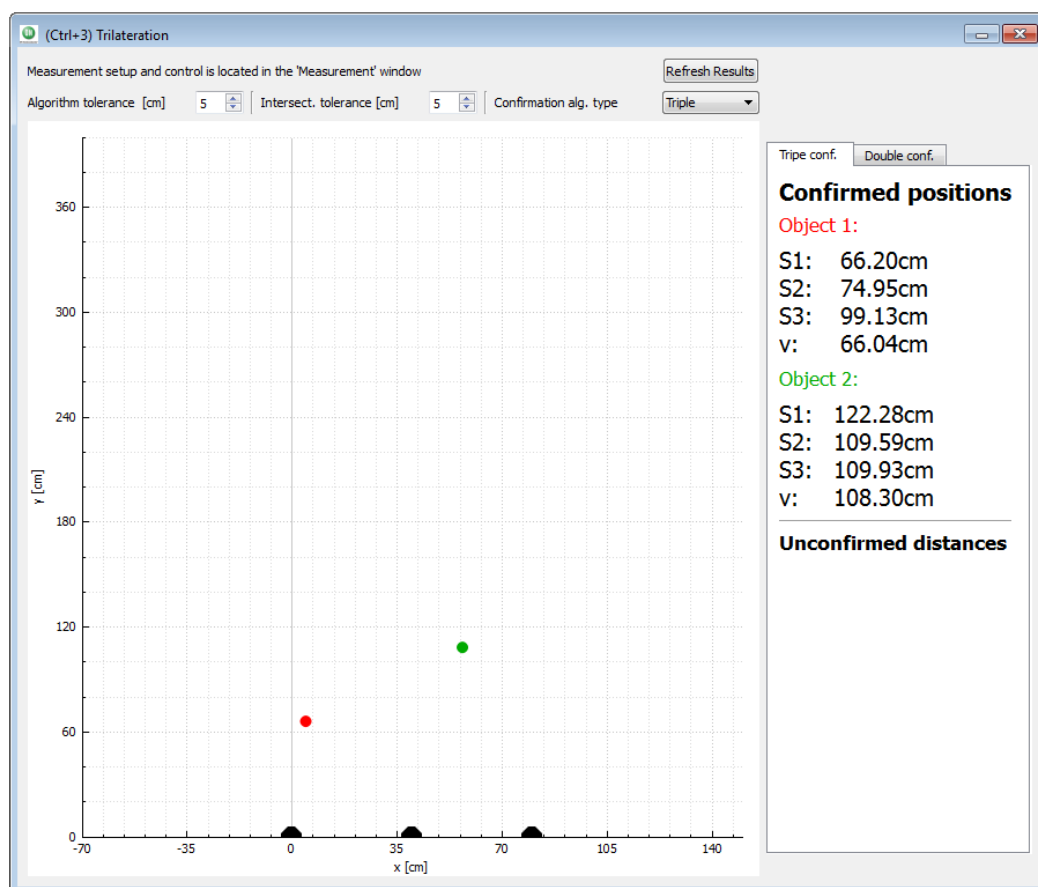


Obr. 3.7: Okno Measurement

Okno *Measurement* zachycené na obr. 3.7 umožňuje nastavit hned několik parametrů měřicího cyklu. Před zahájením prvního měření je jedním z nejdůležitějších úkolů nakonfigurování volatilní paměti obvodů NCV75215, ve které jsou uloženy údaje o zvolené délce měření, průběhu časově závislé křivky prahu detekce echa, požadované vysílací frekvenci a mnohé další. Ručně je možné tyto parametry nastavovat v původním okně *NM Controller*, ale pro zjednodušení tohoto procesu bylo přidáno tlačítko *Default P215 Configuration*. Po jeho stisku je v adresáři aplikace lokalizován soubor „default.bench“, jenž obsahuje předem uloženou konfiguraci, která je následně nahrána do všech tří připojených čipů NCV75215. Před zahájením měření je možné zvolit periodu měření v měřicím cyklu v textovém poli *Measurement period*, což ovlivní dobu, po kterou mikrokontrolér čeká po konci měření do spuštění toho následujícího (viz obr. 3.6). Perioda měření nesmí být kratší než je délka měření nastavená v obvodech NCV75215, jinak by příkaz k zahájení následujícího měření zasahoval do průběhu spuštěného měření a obvody by tento příkaz ignorovaly. Tuto podmínku software hlídá a při jejím nesplnění vyvolá chybovou hlášku. V rozbalovacím seznamu *Indirect mode THR. table* je možné vybrat, která ze dvou tabulek popisujících průběh časově závislé křivky prahu detekce echa bude použita



u senzorů v nepřímém režimu měření. V případě volby *Thr. 1* je použita stejná křivka pro senzory v režimu vysílače i přijímače. Volbou *Thr. 2* dojde k rozdělení a senzor v režimu vysílače bude používat při posuzování přítomnosti echa jinou tabulku popisující průběh této křivky než senzory v režimu přijímače. To může být výhodné v situacích, v nichž je u senzorů v režimu přijímače žádoucí velmi nízký práh detekce echa například těsně po začátku měření, ale u senzoru zajišťujícího vysílání je požadovaný vysoký práh detekce echa, aby bylo eliminováno nechtěné falešné echo způsobené kupříkladu odrazem od země. Nastavení tabulky popisující tvar křivky prahu detekce echa a periody měření je nutné před začátkem měření odeslat do mikrokontroléru stiskem tlačítka *Configure microcontroller*. Po těchto dvou krocích je konečně možné zahájit samotný měřicí cyklus. Stiskem tlačítka *Meas. Once* je do mikrokontroléru odeslán příkaz ke spuštění jednoho měřicího cyklu, kdežto tlačítko *Start/Stop* spouští a zastavuje smyčku periodického měření. Po konci každého měřicího cyklu jsou z mikrokontroléru vyžádány výsledné změřené časy, což lze uskutečnit i ručně stiskem tlačítka *Get Data*. Tyto data jsou tvořena řetězcem obsahujícím všechny změřené časy za daný měřicí cyklus oddělenými čárkou. Po extrakci časů z řetězce jsou data předána do modulu obsluhujícího okno *Trilateration*. V dolní části okna je uveden stručný návod na korektní spuštění měření.



Obr. 3.8: Okno Trilateration



Oknu *Trilateration* zobrazenému na obr. 3.8 dominuje grafický prvek obstarávající vykreslování zaznamenaných objektů do souřadnicové sítě. Cílem bylo zajistit, aby tato grafická reprezentace výsledků mohla být co největší, proto je také samotné nastavování měření umístěno v samostatném okně. Jediným tlačítkem *Refresh Results* je spuštěn dlouhý proces začínající převedením časů změřených během měřicího cyklu na vzdálenosti. Poté následuje určení potenciálních pozic překážek v prostoru jedním z vyvinutých algoritmů. V rozbalovacím seznamu *Confirmation alg. type* lze vybrat, zda budou převedené vzdálenosti kontrolovány algoritmem založeným na využití všech tří měření (volba *Triple* – viz kapitola 2.3.2) nebo algoritmem porovnávajícím pouze dvě po sobě jdoucí měření (volba *Double* – viz kapitola 2.3.1). S algoritmy se pojí i nastavení tolerance při posuzování shody naměřených vzdáleností, kterou lze upravit v textovém poli *Algorithm tolerance* v rozsahu od 0 do 25 cm. Výchozí hodnota 5 cm obvykle zajišťuje dobré výsledky měření. Po potvrzovacích algoritmech následuje kontrola výsledků a případné výpočty přesné pozice objektu. V případě volby algoritmu založeném na porovnávání pouze dvou po sobě jdoucích měření se kontrola skládá pouze z kontroly sestrojitelnosti trojúhelníku s vrcholy tvořenými dvěma senzory a detekovaným objektem. Jeho strany tvoří potvrzené změřené vzdálenosti od jednotlivých senzorů a předem známá vzdálenost mezi těmito senzory. V případě že je takový trojúhelník možné zkonstruovat, jsou vypočteny souřadnice objektu dle rovnic 2.14 a 2.15. U algoritmu využívajícího údaje ze všech tří měření je kontrola komplexnější a umožňuje i vyloučení falešně potvrzených překážek. První krok kontroly je stejný. Ověří se, zda je možné ze dvou potvrzených vzdáleností změřených senzory 1 a 2 zkonstruovat trojúhelník. Pokud ano, jsou stejně jako v předchozím případě vypočteny souřadnice jeho vrcholu, kde by měla ležet překážka. Následně se vypočítá vzdálenost od pozice objektu k souřadnicím umístění senzoru 3 a porovná se s potvrzenou vzdáleností změřenou senzorem 3. Pokud jsou tyto vzdálenosti stejné, je překážka potvrzena a její souřadnice jsou předány do funkce zajišťující jejich grafické znázornění. Toleranci při tomto porovnávání je možné nastavit v textovém poli *Intersect. tolerance* v rozsahu 0 až 25cm. Výchozí hodnotou je opět 5 cm.

Souřadnice potvrzených překážek, jež prošly kontrolou, ale i nepotvrzené vzdálenosti zjištěné v režimu přímého měření jsou následně předány funkci obstarávající jejich grafické znázornění. Zároveň jsou informace o jednotlivých překážkách vypisovány v jedné ze dvou záložek umístěných napravo od grafického prvku se souřadnicovou sítí. Záložky jsou přepínány dle zvoleného typu algoritmu automaticky. V souřadnicové síti jsou nejprve znázorněny pozice jednotlivých senzorů výraznými černými tečkami. Senzor 1 je umístěn vlevo na souřadnicích  $[0, 0]$ , senzor 3 vpravo v bodě  $[80 \text{ cm}, 0]$  a senzor 2 je uprostřed mezi nimi. Následuje zobrazení potvrzených překážek. Ty jsou v souřadnicové síti reprezentovány barevnými tečkami. Barevné jsou z důvodu snadného spojení grafické reprezentace s textovým výstupem přesně informujícím o souřadnicích daného objektu. Nepotvrzené vzdálenosti měřené v režimu přímého měření jsou zobrazeny jako modrá část kružnice s poloměrem rovným dané vzdálenosti a se středem v souřadnicích senzoru, který ji změřil. Prvkem omezujícím oblast zobrazení části kružnice je horizontální vyzařovací úhel, jenž je pro použitý měnič roven  $80^\circ$  (viz kapitola 1.2.1). V textovém výstupu jsou u potvrzených pozic objektů vypsány vzdálenosti od všech senzorů, pomocí kterých byla tato pozice určena a také nejkratší vzdálenost  $v$  od nárazníku k objektu (výška trojúhelníku). U nepotvrzených měření je pouze vypsána změřená vzdálenost, a jaký senzor ji změřil. Všechny vzdálenosti jsou uvedeny v centimetrech.

Po vykreslení všech detekovaných objektů je zkontrolováno, zda je zapnuto periodické měření. Pokud ano, pak okamžitě následuje spuštění dalšího měřicího cyklu odesláním příslušného příkazu do mikrokontroléru.

### 3.4 Ověřovací měření a jeho výsledky

Ověření funkčnosti vytvořených algoritmů, upraveného softwaru a firmwaru bylo prováděno měřením v reálném prostředí. K tomu byla použita jedna deska P215\_TRIANG\_V1 a tři dobře naladěné desky P215\_EVK\_V1 s piezoelektrickými měniči Murata MA58MF14-7N. Měniče byly před měřením fixovány v imitaci nárazníku.

Jako překážky při měření posloužily především dostatečně vysoké plastové tyče s průměrem 75 mm, které simulují například sloupky plotu. Tyče byly postupně umísťovány do náhodných pozic před nárazníkem. Cílem bylo otestovat různé situace, ve kterých jsou překážky blízko nárazníku, v rovině za sebou nebo vedle sebe. Vzdálenosti vypočtené algoritmem byly srovnávány se vzdálenostmi změřenými svinovacím metrem. Měření probíhalo v prázdné a dostatečně velké místnosti, takže zde nebyly kromě použitých plastových tyčí přítomny žádné další překážky, od kterých by se ultrazvuk mohl odrážet a způsobovat detekci jiného objektu. Díky umístění měničů do výšky 80 cm nad úroveň podlahy byly odrazy taktéž minimalizovány. Celá měřicí sestava je zachycena na Obr. 3.9.



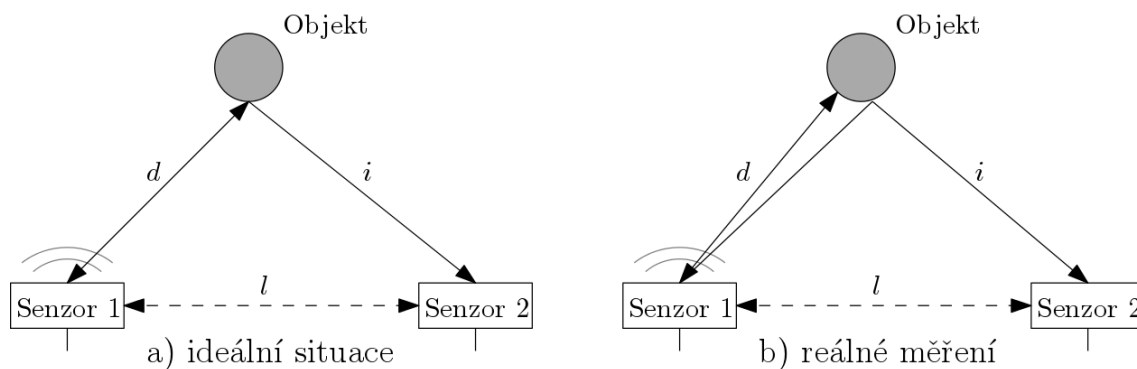
Obr. 3.9: Měřicí stanoviště s nárazníkem a použitými překážkami

Postupně bylo provedeno několik měření s potvrzovacími algoritmy využívajícími informace ze dvou i ze tří měření. Výsledky měření jsou zaznamenány v příloze A. K výpočtu relativní chyby měření byl využit vztah [10]:

$$\delta_R = \frac{l_{uz} - l_m}{l_{uz}} \times 100 \quad [\%], \quad (3.1)$$

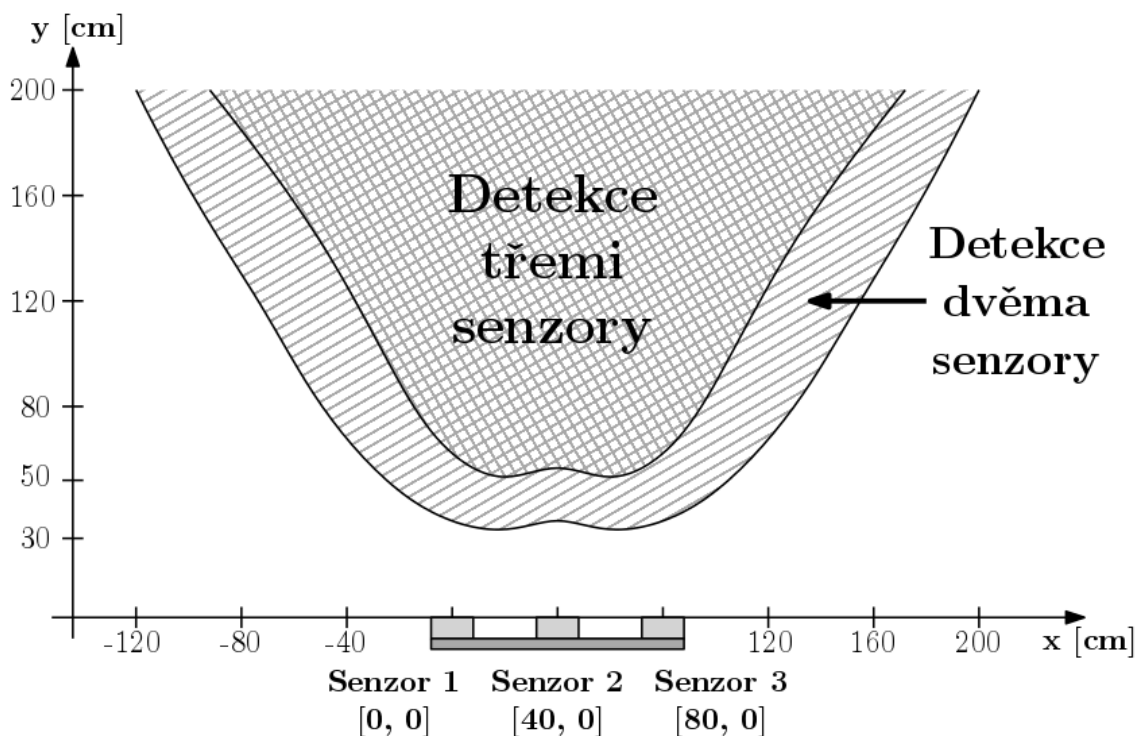
do něhož byla za předpokládanou správně měřenou hodnotu dosazena vzdálenost měřená metrem ( $l_m$ ) a vzdálenost změřená pomocí ultrazvuku byla dosazena za  $l_{uz}$ . Výsledné relativní chyby měření se v naprosté většině případů pohybují pod hranicí 3%, což se zdá jako přijatelná hodnota pro účely automobilových parkovacích asistentů. Znalost pozice překážky na centimetr přesně přeci jen není v takové situaci tak důležitá jako samotná spolehlivá detekce překážky na daném místě. Chyby mohly být způsobeny mnoha faktory, mezi které patří například nepřesné umístění senzorů, jejichž vzájemná vzdálenost je také parametrem při výpočtech. Dále pak měření zcela jistě ovlivňují klimatické podmínky, které mají vliv na rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Během ověřovacího měření, které probíhalo ve vnitřních prostorách, byla teplota 23 °C, relativní vlhkost 37,5 % a tlak 1008 hPa. Kompenzace vlivu klimatických podmínek nebyla ve vyvinutém softwaru implementována, jelikož využití desky plošných spojů jednotlivých modulů neobsahuje žádné čidlo teploty, vlhkosti nebo tlaku. Z čipu NCV75215 je sice možné vyčíst teplotu, ale to je teplota uvnitř čipu, který se během jeho provozu zahřívá, a tak není taková informace příliš relevantní pro teplotní kompenzaci. Rychlost zvuku tedy byla považována za konstantu  $v = 343 \text{ m.s}^{-1}$ .

Velmi významným zdrojem chyb především při měření na krátkých vzdálenostech je skutečnost, že se ultrazvuk odráží od stejné překážky k různým senzorům z různých míst. Ve větších vzdálenostech tyto místa téměř splývají a vliv není tak veliký jako v krátkých vzdálenostech. Chyba je ještě umocněna, pokud je mezi překážkou a osou senzoru velký úhel. Vznik této chyby je ilustrován na obr. 3.10. Algoritmus vždy předpokládá ideální situaci, ve které se ultrazvuk odráží ke všem objektům ze stejného místa, což v reálných situacích neplatí. Obvykle se to projeví tím, že se objekt zdá vzdálenější, než ve skutečnosti je. Vlivem této chyby překročila relativní chyba měření hranici 7% během ověřování nejkratší měřitelné vzdálenosti. Jedním z největších faktorů působících na měření je konfigurace samotných čipů NCV75215. Z tohoto důvodu je jednou z elektronických příloh k této práci i při měření použitý konfigurační soubor. Měření svinovacím metrem, které je pro účely výpočtu relativní chyby měření považováno za referenční, samozřejmě také není zcela přesné.



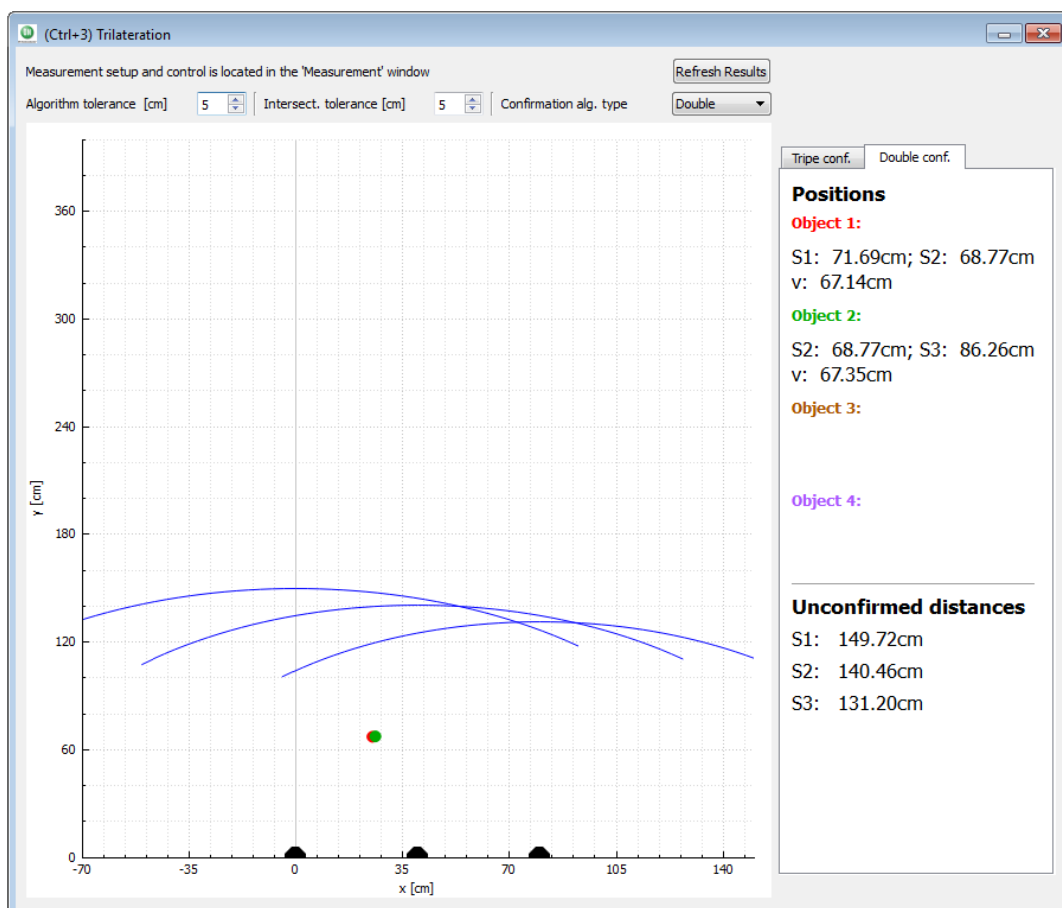
Obr. 3.10: Rozdíl mezi ideálním místem odrazu ultrazvuku od překážky a skutečností

Z výsledků měření vyplývá, že nejkratší měřitelná vzdálenost je s využitím algoritmu založeném na dvojitěm potvrzení vzdálenosti přibližně 30 cm od nárazníku a s využitím algoritmu založeném na potvrzení ze všech tří měření stoupá tato minimální vzdálenost až na 40 cm. To je dáno tím, že objekt musí být vzdálenější, aby jej mohly detekovat všechny tři senzory. S klesající vzdáleností od nárazníku klesne počet senzorů měřících vzdálenost k tomuto objektu ze tří na dva a pod hranicí 30 cm měří vzdálenost k objektu jen jeden nebo i žádný senzor. Navíc obvody NCV75215 mají s konfigurací použitou při ověřovacích měření (maximální budící proud, 20 budících pulsů) slepou zónu až do 20 cm od senzoru. Překážky byly umísťovány až do třímetrové vzdálenosti od nárazníku. Během ověřovacích měření byly rovněž zmapovány oblasti, ve kterých je možné detekovat objekt s využitím jednotlivých algoritmů. Výsledek je zobrazen na obr. 3.11.



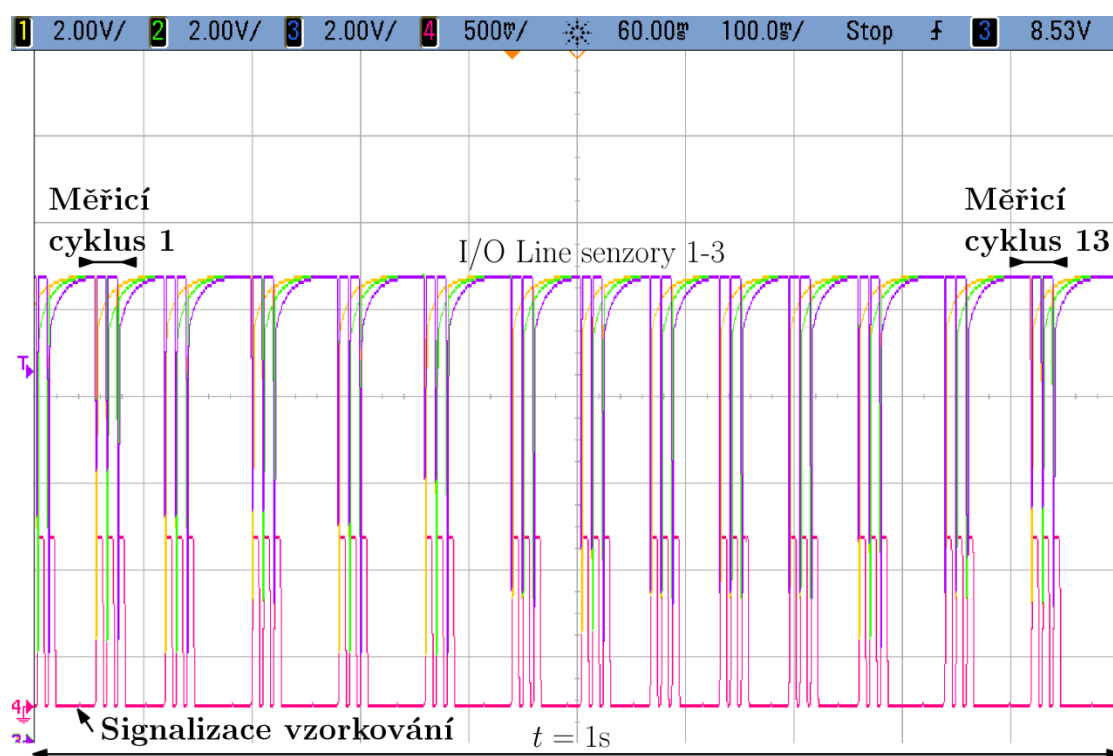
Obr. 3.11: Vyznačení oblastí v nichž je možné určit pozici překážky jednotlivými algoritmy

Při použití algoritmu založeného na dvojitým potvrzování vzdáleností může být pozice jedné překážky určena oběma dvojicemi senzorů, což je zobrazeno na obr. 3.12 společně s grafickým znázorněním nepotvrzených vzdáleností. Tato situace nenastane například ve velmi krátkých vzdálenostech, nebo pokud je překážka v zákrytu pro jeden z jedné dvojice senzorů. Proto je i v tab. 4.2 pro některá měření odlišný počet lokalizovaných objektů. Zvláštní situací je případ, ve kterém jsou překážky umístěny přibližně ve stejné vzdálenosti od jednoho ze senzorů. Echa odražená od těchto objektů se při vysílání tímto senzorem s vysokou pravděpodobností na přijímači spojí do jednoho širšího echa. Pokud objekty nejsou zcela přesně ve stejné vzdálenosti od tohoto senzoru, ale je mezi nimi několikacentimetrový rozdíl, projeví se tento rozdíl jako chyba v určení pozice jednoho z objektů. Při větším rozdílu vzdáleností je již snazší na přijímači rozpoznat příchod dvou oddělených odrazů. V některých situacích je pozice objektu určená tímto algoritmem méně spolehlivá než ta určená ze všech tří měření. Algoritmus využívající všech tří měření sice spolehlivě určí skutečnou pozici překážky, ale zaznamená objekt v menší oblasti. Algoritmus založený na dvojitým potvrzení vzdáleností je tedy vhodný spíše na měření velmi krátkých vzdáleností. K určení pozice vzdálenějších objektů je vhodnější použít spolehlivější algoritmus využívající všech tří měření.



Obr. 3.12: Okno trilateration při použití algoritmu založeného na dvojitým potvrzování vzdáleností.

Pozitivním zjištěním byla velká stabilita změřených vzdáleností, kvůli čemuž nebylo zapotřebí implementovat žádné číslicové filtry. Nepřítomnost filtrů rovněž dovolovala pozorovat okamžité změny polohy pohybujícího se objektu. Během ověřovacích měření byla konfigurace měřicího cyklu taková, že bylo dokončeno přibližně 8 měřicích cyklů za vteřinu (tzn. 24 měření za sekundu). Tento počet byl dostatečný pro plynulé sledování objektu pohybujícího se přibližně rychlostí  $1 \text{ m.s}^{-1}$  v oblasti před senzory. Pokud je omezena maximální měřitelná vzdálenost na přibližně 1 metr (zkrácení doby měření na nejnižší možnou hodnotu 6ms) a je nastavena co možná nejkratší perioda měření (7 ms), může být s vyhotoveným softwarem a firmwarem uskutečněno až 13 měřicích cyklů za vteřinu (39 měření za sekundu). Tato hodnota je působivá v porovnání s jedním měřicím cyklem za 2 vteřiny, což byla maximální rychlost měření při první iteraci úprav softwaru. Průběh signálů na sběrnici I/O Line při nejrychlejší nastavení je zachycen na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Komunikace na I/O Line během jedné vteřiny při nejrychlejší možnému spuštění měření (bez zachycených ech).

## 4 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla realizace přípravku schopného lokalizovat několik překážek v rovině před ultrazvukovými senzory. Realizovaný přípravek využívá tři ultrazvukových senzorů spojených s integrovanými obvody NCV75215 od společnosti ON Semiconductor k zjištění přesné pozice až dvou objektů současně. Výše uvedený integrovaný obvod je určený do parkovacích asistentů často používaných ve vozidlech, proto byla i celá práce orientována tímto směrem.

První část práce je věnována popisu šíření ultrazvuku prostorem. Především je zde popisována závislost rychlosti šíření zvuku na teplotě, tlaku a vlhkosti, což ovlivňuje přesnost měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku v různých klimatických podmínkách. Dále je zde popsán odraz ultrazvuku na rozhraní dvou prostředí, což je podstatný jev pro účely měření vzdálenosti k objektům. Následně je představen základní koncept měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku, který spočívá v měření času, jenž uplynul od vyslání ultrazvukového signálu do jeho zpětného příjmu po odrazu od překážky. Rozebrány jsou i základy triangulace a trilaterace, které slouží ke stanovení pozice objektu v rovině. V této části jsou rovněž popsány dvě nejdůležitější komponenty k uskutečnění praktického měření a to piezoelektrický měnič, jenž tvoří základ velké většiny ultrazvukových senzorů, a integrovaný obvod NCV75215 sloužící k řízení vysílání a příjmu ultrazvuku těmito senzory. Kapitulu ukončuje krátká analýza různých typů parkovacích asistentů, jejichž schopnosti posloužily jako inspirace při vývoji výsledného přípravku.

Ve druhé části práce je popsán návrh algoritmů sloužících k určení polohy a vzdálenosti objektů v prostoru. První navržený algoritmus je určený k lokalizaci jedné překážky s pomocí dvou ultrazvukových senzorů. Jeho vylepšením byl získán algoritmus, který dokáže se stejným počtem senzorů určit pozice až dvou objektů. Vylepšení spočívalo v provedení dvou po sobě jdoucích měření s opačnými konfiguracemi senzorů (výměna role vysílače a přijímače) a jejich následné porovnávání. Nejspolehlivějším vytvořeným algoritmem je postup využívající vzdálenosti změřené třemi ultrazvukovými senzory během tří po sobě jdoucích měření, ve kterých se všechny senzory postupně vystřídají v roli vysílače.

Třetí část práce popisuje úpravy provedené v softwaru a firmwaru za účelem implementace vyvinutých algoritmů. Do grafického uživatelského rozhraní byla přidána dvě nová okna. První z nich slouží ke spouštění měření třemi senzory současně a k nastavení některých parametrů měření. Ve druhém z nich jsou objekty detekované vyvinutými algoritmy graficky znázorněny v systému souřadnic. Došlo k implementaci algoritmů využívajících dvě anebo tři po sobě jdoucí měření, mezi nimiž je možné v softwaru přepínat. Každý má své výhody a nevýhody, což bylo potvrzeno ověřovacími měřeními, jehož průběh a výsledky jsou rovněž popsány v této části.

Výsledný přípravek s upraveným softwarem a firmwarem je schopný přesně lokalizovat až dva objekty v poměrně velké oblasti před třemi ultrazvukovými senzory umístěnými ve vytvořené imitaci nárazníku vozidla. K tomu rovněž využívá tři desky plošných spojů obsahující integrované obvody NCV75215 a jednu desku s mikrokontrolérem řídícím komunikaci. Nejkratší měřitelná vzdálenost s implementovaným algoritmem využívajícím pouze dvě měření je přibližně 30 cm. Při použití algoritmu využívajícího všechny tři měření tato vzdálenost roste na 40 cm, ale na druhou stranu se zvyšuje jistota správné detekce pozice objektu. Díky vysoké rychlosti měření a zpracování je možné vykreslit pozice detekovaných objektů v prostoru až třináctkrát za sekundu, což postačuje i ke sledování pohybující se překážky. Relativní přesnost změřených vzdáleností, z nichž je vypočtena pozice objektu, se nejčastěji pohybuje okolo 3%, což je velmi dobrý výsledek vzhledem k množství vlivů, které působí na rychlost šíření ultrazvuku. Budoucí úpravy by měly být zaměřeny na implementaci čidel umožňujících kompenzaci zejména klimatických vlivů a využití více ultrazvukových senzorů vložených do reálného nárazníku vozidla. Upravený software i firmware je možné dále rozšířit a případně zjišťovat i pozice více než dvou objektů současně. K účelu demonstrace schopností integrovaného obvodu NCV75215 a jeho potenciální aplikace v automobilových parkovacích asistentech jsou již nyní schopnosti přípravku postačující.



# LITERATURA

- [1] SELFRIDGE, Alan. Acoustic properties: Technique Tables. In: *Signal Processing: Ultrasonic Doppler Velocimetry* [online]. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.signal-processing.com/table.php>
- [2] HIKITA, Munenori. An introduction to ultrasonic sensors for vehicle parking. In: *New Electronics: The site for electronic design engineers* [online]. 2010 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/an-introduction-to-ultrasonic-sensors-for-vehicle-parking/24966/>
- [3] Attenuation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Attenuation>
- [4] Elektromagnetický parkovací asistent. *Mylms: web o elektronice* [online]. 2015 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-elektromagneticky-parkovaci-asistent/>
- [5] KAZELLE, Jiří a další. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy* [Elektronické skriptum]. FEKT VUT v Brně [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=22389](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=22389)
- [6] KANTOR, Jiří. External Coupling Circuitry: Park Assist tuning cook-book. Brno, 2016.
- [7] KAŇKA, Jan. Intenzita zvuku – decibel. In: *TZB-info: Stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/216-intenzita-zvuku-decibel>
- [8] VALÁŠEK, Dominik. Jak fungují parkovací senzory? A co všechno umí parkovací asistent?. In: *Automix.cz* [online]. 2016 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://automix.cars.cz/zivot-ridice/jak-funguji-parkovaci-senzory-a-co-parkovaci-asistent-20170607.html>
- [9] MA58MF14-7N. *Murata Manufacturing Co., Ltd.* [online]. [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: <http://www.murata.com/products/productdetail?partno=MA58MF14-7N>
- [10] BEJČEK, Ludvík a další. *Měření v elektrotechnice* [Elektronické skriptum]. FEKT VUT v Brně [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=19338](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=19338)
- [11] ON SEMICONDUCTOR. NCV75215: Ultrasonic Parking Distance Measurement ASSP. 2017.
- [12] Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích. In: *ČVUT Praha: Ústav fyziky* [online]. Praha, 2013 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_11.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf)
- [13] Poissonova konstanta. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Poissonova\\_konstanta](https://cs.wikipedia.org/wiki/Poissonova_konstanta)
- [14] CURTIS, Keith. Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 2015, (6) [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>

- [15] Problémy s parkováním hravě vyřeší asistent. Jak vybrat správný systém? In: *Autolog.cz: Magazín pro řidiče* [online]. 2016 [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.autolog.cz/problemy-s-parkovanim-hrave-vyresi-asistent-jak-vybrat-spravny-system/>
- [16] Rychlost zvuku. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost\\_zvuku](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_zvuku)
- [17] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0114-4.
- [18] Tenkovrstvé piezoelektrické senzory. In: *VŠChT Praha: Fakulta chemicko-inženýrská* [online]. Praha [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: [https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14\\_senzory\\_QCM.pdf?redirected](https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf?redirected)
- [19] Trilateration. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>
- [20] Ultrasonic Sensor. *Murata Manufacturing Co., Ltd.* [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <https://www.murata.com/about/newsroom/techmag/metamorphosis17/productsmarket/ultrasonic>
- [21] Základy piezokeramické technologie: Piezoelektrický princip, perovskit a polarizace. *CeramTec: The ceramic experts* [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>
- [22] PILNÝ, Roman. Zisk a směrová charakteristika. In: *RC - Eagle Eye* [online]. [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/5-Theory-Trocha-teorie/22-Zisk-a-smerova-charakteristika>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$a$	Délka
$A$	Útlum akustického vlnění
$b$	Délka
$C$	Elektrická kapacita
$d, D$	Vzdálenost měřená od vysílače k objektu
$D_{\text{curr}}$	Vzdálenost změřená v současném měření
$D_{\text{next}}$	Vzdálenost změřená v následujícím měření
$D_{\text{prev}}$	Vzdálenost změřená v předchozím měření
$f$	Frekvence vlnění
$f_{\text{rez}}$	Rezonanční frekvence
$h$	Výška
$I$	Intenzita zvuku
$i, I$	Vzdálenost měřená od objektu k přijímači
$I_0$	Prahová hodnota akustické intenzity
$l$	Vzdálenost mezi dvěma parkovacími senzory
$L$	Indukčnost
$l_1$	Vzdálenost od ultrazvukového senzoru v počátku souřadnic k patě výšky
$l_m$	Vzdálenost změřená svinovacím metrem
$L_p$	Hladina akustického tlaku
$L_{\text{SEC}}$	Indukčnost sekundárního vinutí transformátoru
$l_{\text{uz}}$	Vzdálenost změřená ultrazvukem
$O$	Objekt
$P$	Pata výšky
$p_0$	Prahová hodnota akustického tlaku
$p_a$	Akustický tlak v prostředí
$p_c$	Celkový tlak v prostředí
$p_s$	Statický tlak v prostředí
$Q$	Činitel jakosti
$R$	Součinitel odrazu
$R$	Elektrický odpor
$r$	Poloměr kružnice

$S$	Plocha
$SI$	Senzor 1
$T$	Perioda vlnění
$t$	Čas
$t_{\text{CMD}}$	Délka řídicího pulsu
$TOF_D$	Čas změřený v přímém režimu měření
$TOF_I$	Čas změřený v nepřímém režimu měření
$t_{\text{V-O-P}}$	Čas za který ultrazvuk urazil trajektorii mezi vysílačem, objektem a přijímačem
$v$	Rychlost šíření zvuku
$v_a$	Akustická rychlost
$v_L$	Rychlost šíření longitudálního vlnění
$v_T$	Rychlost šíření transversálního vlnění
$v_t$	Výška trojúhelníku
$Z_a$	Akustická impedance
$\alpha$	Absorpční koeficient
$\gamma$	Teplotní činitel rozpínivosti plynu
$\delta_R$	Relativní chyba měření
$\vartheta$	Teplota ve stupních Celsia
$\kappa$	Poissonova konstanta
$\lambda$	Vlnová délka
$\rho$	Hustota
DRVA	Výstup budícího obvodu A (driver A)
DRVB	Výstup budícího obvodu B (driver B)
DRVC	Výstup budícího obvodu C (driver C)
GPS	Globální polohový systém
I/O Line	Komunikační sběrnice
LED	Elektroluminiscenční dioda
LiDAR	Light Detection And Ranging, metoda měření vzdálenosti na základě měření doby šíření laserového paprsku
TOF	Time of flight, čas od počátku vysílání signálu do momentu jeho zpětného přijetí

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Tabulky naměřených hodnot</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Imitace nárazníku</b>	<b>63</b>

# A TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

Tab. 4.1: Hodnoty naměřené při použití algoritmu založeného na využití všech tří měření

	Vzdálenost od S1		$\delta_R$ [%]	Vzdálenost od S2		$\delta_R$ [%]	Vzdálenost od S3		$\delta_R$ [%]	Nejkratší vzdálenost		$\delta_R$ [%]
	$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$V_{T, m}$ [cm]	$V_{T, uz}$ [cm]	
Měření 1	109,5	109,3	-0,2	99,5	99,5	0,0	104,0	104,4	0,4	99,0	99,3	0,3
	200,0	198,8	-0,6	205,0	203,7	-0,6	216,0	215,2	-0,4	200,0	198,7	-0,7
Měření 2	71,0	72,7	2,3	44,0	45,5	3,3	48,0	49,4	2,8	40,5	40,7	0,5
	62,5	63,6	1,7	67,0	68,3	1,9	90,5	91,2	0,8	61,0	62,4	2,2
Měření 3	153,5	152,0	-1,0	165,5	164,1	-0,9	186,0	185,1	-0,5	150,0	149,3	-0,5
	263,0	259,3	-1,4	241,0	239,1	-0,8	225,0	223,6	-0,6	212,0	213,3	0,6
Měření 4	67,0	67,9	1,3	61,0	62,3	2,1	77,5	78,7	1,5	59,0	61,3	3,8
	140,0	138,9	-0,8	135,0	134,3	-0,5	141,0	140,1	-0,6	133,5	134,2	0,5
Měření 5	143,0	142,3	-0,5	145,5	144,9	-0,4	159,0	157,8	-0,8	142,5	141,9	-0,4
	220,0	218,2	-0,8	206,0	204,8	-0,6	198,5	198,8	0,2	198,0	198,4	0,2
Měření 6	145,5	144,6	-0,6	149,0	147,3	-1,2	161,5	160,0	-0,9	146,0	144,2	-1,2
	302,0	296,1	-2,0	296,0	290,2	-2,0	294,5	290,7	-1,3	294,0	289,3	-1,6
Měření 7	51,0	52,5	2,9	51,5	52,7	2,3	75,5	77,5	2,6	48,0	48,6	1,2
	106,0	106,2	0,2	84,0	84,2	0,2	77,0	77,5	0,6	77,0	77,8	1,0
Měření 8	49,5	51,1	3,1	62,5	64,1	2,5	97,0	97,6	0,6	49,5	51,1	3,1
	90,5	90,4	-0,1	85,0	85,6	0,7	93,0	97,6	4,7	85,0	85,1	0,1

Tab. 4.2: Hodnoty naměřené při použití algoritmu založeného na porovnávání dvou po sobě jdoucích měření

	Vzdálenost od S1		$\delta_R$ [%]	Vzdálenost od S2		$\delta_R$ [%]	Vzdálenost od S3		$\delta_R$ [%]	Nejkratší vzdálenost		$\delta_R$ [%]
	$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$l_m$ [cm]	$l_{uz}$ [cm]		$V_{T, m}$ [cm]	$V_{T, uz}$ [cm]	
Měření 1	109,5	109,3	-0,2	99,5	99,5	0,0	-	-	-	99,0	99,3	0,3
	200,0	198,8	-0,6	205,0	203,8	-0,6	-	-	-	200,0	198,8	-0,6
	-	-	-	99,5	99,5	0,0	104,0	104,6	0,6	99,0	99,2	0,2
	-	-	-	205,0	203,7	-0,6	216,0	215,3	-0,3	200,0	199,7	-0,2
Měření 2	67,0	67,9	1,3	61,0	62,3	2,1	-	-	-	59,0	61,3	3,8
	140,0	139,1	-0,6	135,0	134,3	-0,5	-	-	-	133,5	134,2	0,5
	-	-	-	61,0	62,3	2,1	77,5	78,9	1,8	59,0	61,5	4,1
	-	-	-	135,0	134,3	-0,5	141,0	140,1	-0,6	133,5	134,3	0,6
Měření 3	80,5	80,1	-0,5	81,5	82,3	1,0	-	-	-	79,0	79,1	0,1
	-	-	-	72,5	73,1	0,8	67,0	68,3	1,9	67,0	67,3	0,4
	-	-	-	81,5	82,3	1,0	100,5	100,3	-0,2	79,0	79,6	0,8
Měření 4	196,0	193,6	-1,2	185,0	183,2	-1,0	-	-	-	180,5	180,8	0,2
	220,0	216,1	-1,8	230,0	227,6	-1,1	-	-	-	217,0	211,6	-2,6
	-	-	-	185,0	183,2	-1,0	181,0	180,4	-0,3	180,5	180,3	-0,1
	-	-	-	230,0	227,6	-1,1	251,0	245,4	-2,3	217,0	211,0	-2,8
Měření 5	81,0	81,0	0,0	81,5	82,0	0,6	-	-	-	79,0	79,0	0,0
	-	-	-	36,0	37,2	3,2	39,0	40,1	2,7	30,5	33,0	7,6

Tab. 4.3: Hodnoty naměřené při mapování oblasti detekce překážky s využitím algoritmu založeného na využití všech tří měření

$v_t$ [cm]	$x_1$ [cm]	$x_2$ [cm]
50	20,0	60,0
60	0,0	80,0
80	-15,0	95,0
120	-35,0	115,0
160	-60,0	140,0
200	-90,0	170,0

Tab. 4.4: Hodnoty naměřené při mapování oblasti detekce překážky s využitím algoritmu založeného na porovnávání pouze dvou po sobě jdoucích měření

$v_t$ [cm]	$x_1$ [cm]	$x_2$ [cm]
30	20,0	60,0
40	-15,0	95,0
80	-50,0	130,0
120	-70,0	150,0
160	-100,0	180,0
200	-120,0	200,0



## B IMITACE NÁRAZNÍKU

